

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil et du bâtiment

CONCEPTION, CONSTRUCTION ET SUIVI D'UN PLAN
EXPÉRIMENTAL POUR CARACTÉRISER LES INFILTRATIONS
DANS UN RECOUVREMENT ALTERNATIF D'UN
SITE D'ENFOUISSEMENT

Mémoire de maîtrise ès science appliquée
Spécialité : Génie civil | Géotechnique environnementale

Virginie SIMARD

Sherbrooke (Québec) Canada

Décembre 2019

MEMBRES DU JURY

Alexandre CABRAL

Directeur de recherche

Ph.D., ing. Département de génie civil et du bâtiment, Université de Sherbrooke

Tarek ABICHOU

Évaluateur

Ph.D., ing. Department of Civil and Environmental Engineering, Florida State University

Marie-Amélie BOUCHER

Évaluatrice

Ph.D., ing.jr. Département de génie civil et du bâtiment, Université de Sherbrooke

RÉSUMÉ

Ce travail de maîtrise s’imbrique dans les sciences de la géotechnique, mais plus précisément dans le domaine de la géotechnique environnementale. Ce projet de recherche se déroule au site d’enfouissement de Waste Management Inc. situé à St-Nicéphore. Le besoin du partenaire industriel est d’étudier les infiltrations dans le recouvrement du site d’enfouissement, ce qui est lié à la production de lixiviat. Également, il désire évaluer la possibilité d’utiliser des sols contaminés de catégorie BC pour effectuer le profillement du recouvrement actuel, ce qui permettrait de modifier sa perméabilité et d’éviter l’enfouissement de ces sols. Le but de ce projet est de caractériser les infiltrations causées par les précipitations dans un recouvrement alternatif d’un site d’enfouissement et pour y parvenir, il faut concevoir, construire et réaliser le suivi d’un plan expérimental dont l’outil principal est les lysimètres.

Pour obtenir les valeurs nécessaires à l’atteinte de cette caractérisation des infiltrations, des travaux préparatoires réalisés en laboratoire et en bureau ont été effectués pour la conception des lysimètres. Par définition, les lysimètres sont des contenants qui permettent la collecte et la mesure des eaux percolées. Ces outils de grande dimension ont été construits au cours du printemps et de l’été 2018. Par la suite, un suivi assidu du fonctionnement et une vérification régulière de l’état des éléments ont été effectués tout au long de l’année.

La réponse du comportement de ce plan expérimental correspond à celle attendue. En effet, les instruments installés fournissent des réponses adéquates. De surcroît, à partir des données obtenues, il est possible de les combiner pour étudier le comportement des lysimètres. Effectivement, des analyses au niveau des valeurs des sondes de teneur en eau et de succion comparées avec celles des taux de précipitation et de percolation ont été faites. De plus, une reconstitution des courbes de rétention d’eau a été effectuée pour connaître le comportement *in situ* des sols non saturés. Les réponses préliminaires aux besoins du partenaire industriel concernent le cumulatif des quantités du taux de percolation et les résultats positifs du suivi chimique des eaux et des sols.

En bref, les travaux réalisés dans le cadre de cette maîtrise s’imbriquent dans l’ensemble de ceux à accomplir pour mener à terme ce grand projet de recherche. Autrement dit, ces travaux correspondent aux étapes initiales de l’étude des infiltrations dans le recouvrement du site d’enfouissement qui va se dérouler durant plusieurs années. Les tâches accomplies pour ce projet global permettent la diminution de la production de lixiviat grâce à une réduction des infiltrations et la valorisation des sols contaminés dans le profillement du recouvrement. Ces changements éventuels pourraient ainsi entraîner des retombées économiques significatives pour le site d’enfouissement de St-Nicéphore.

Mots clés : Lysimètres, Infiltrations, Sols contaminés

REMERCIEMENTS

Merci à mon directeur de recherche, le professeur Alexandre Cabral de m'avoir permis d'intégrer son groupe de recherche, de m'avoir partagé sa passion pour la science et d'avoir fait preuve d'une grande disponibilité. De plus, je désire souligner sa générosité qui était présente autant dans le cadre du projet qu'à l'extérieur de celui-ci.

Merci au professeur, Tarek Abichou, pour sa collaboration importante au sein de ce projet de recherche. Votre précieuse aide a permis d'apercevoir la lumière au bout du tunnel. Vous avez été un allié de taille !

Merci à mon collègue, Mauro Duarte, d'avoir été mon complice au cours de cette belle expérience. Ta volonté d'aider autrui, ta grande curiosité et ta rigueur du travail bien fait ont été des éléments déterminants pour le succès de ma maîtrise. Également, je tenais à te remercier d'avoir été un excellent conseiller au cours de ces deux dernières années autant pour mes questions académiques que celles plus personnelles. Une chance que tu as été là !

Merci à ma sœur, Florence Simard, et mon copain, Vincent Monast, pour votre écoute attentionnée, vos conseils judicieux et vos encouragements constants. Merci pour toutes les petites surprises! Sachez que vous êtes des acteurs déterminants pour le succès de ce diplôme! Merci à mes parents et à ma grand-mère d'avoir toujours été présents et d'avoir cru en moi depuis le début. Votre soutien m'a permis d'être la personne que je suis aujourd'hui. Je vous aime !

Merci à mes amis pour votre présence, d'avoir été ma source de motivation quotidienne et d'avoir partagé avec moi cette magnifique aventure qu'a été la maîtrise.

Alors, on recommence? ;)

TABLE DES MATIÈRES

MEMBRES DU JURY	2
RÉSUMÉ.....	3
REMERCIEMENTS.....	4
LISTE DES FIGURES.....	9
LISTE DES TABLEAUX	13
1 INTRODUCTION	14
1.1 MISE EN CONTEXTE	14
1.2 PROBLÉMATIQUE.....	17
1.2.1 BESOINS DU PARTENAIRE INDUSTRIEL	17
1.2.2 SOLUTION PROPOSÉE	18
1.3 QUESTIONS DE RECHERCHE.....	19
1.4 OBJECTIFS	19
1.4.1 OBJECTIFS DE RECHERCHE	20
1.4.2 OBJECTIFS DE CE TRAVAIL DE MAITRISE	20
1.5 HYPOTHÈSES.....	21
1.6 CONTRIBUTIONS ORIGINALES.....	21
1.7 STRUCTURE DU DOCUMENT.....	22
2 ÉTAT DE L'ART	24
2.1 BILAN HYDRIQUE	24
2.2 GÉNÉRALITÉS DES MILIEUX POREUX	26
2.2.1 RELATIONS DE PHASE DANS LES MILIEUX POREUX NON SATURÉS	26
2.2.2 EFFETS DES REMONTÉES CAPILLAIRES DANS LES MILIEUX POREUX NON SATURÉS	28
2.2.3 POTENTIEL HYDRAULIQUE	28
2.2.4 COURBE DE RÉTENTION D'EAU.....	29

2.2.5	FONCTION DE CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE	33
2.2.6	BARRIÈRE CAPILLAIRE	35
2.3	MÉTHODES D'ESTIMATION DU TAUX DE PERCOLATION	36
2.3.1	CALCULS DU TAUX DE PERCOLATION À PARTIR DES SONDAS DE TENEUR EN EAU ET DE SUCCION	36
2.3.2	LYSIMÈTRE	37
2.4	SITUATION ACTUELLE DES SOLS CONTAMINÉS AU QUÉBEC	43
2.4.1	CRITÈRES GÉNÉRIQUES.....	43
2.4.2	ENFOUISSEMENT DES SOLS CONTAMINÉS.....	43
2.4.3	RÉGLEMENTATION DANS LES SITES D'ENFOUISSEMENT	44
3	EFFECTUER LA CONCEPTION ET LA PLANIFICATION DU PLAN EXPÉRIMENTAL..	46
3.1	LOCALISATION DU PLAN EXPÉRIMENTAL	46
3.2	CONCEPTION	48
3.2.1	EXPLICATIONS DES DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS	48
3.2.2	DÉTERMINATION DE LA HAUTEUR DES PAROIS	50
3.2.3	VÉRIFICATION PAR MODÉLISATION.....	52
3.3	GÉNÉRALITÉS DE LA CONSTRUCTION	56
3.4	PLANIFICATION.....	57
4	DÉTERMINER LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET HYDRAULIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS	58
4.1	PROPRIÉTÉS PHYSIQUES.....	58
4.1.1	EXPLICATIONS DES NORMES ET DE LA THÉORIE.....	58
4.1.2	RÉSULTATS.....	61
4.2	PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES.....	62
4.2.1	COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ SATURÉE (K_{SAT})	62
4.2.2	COURBE DE RÉTENTION D'EAU (CRE) ET FONCTION DE CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE (K-FCT) ..	65
5	VÉRIFIER LA CONFORMITÉ ET CALIBRER LES INSTRUMENTS.....	68
5.1	STATION MÉTÉOROLOGIQUE	69
5.2	CONTENANT AVEC UN AUGET BASCULEUR	71

5.3	TENSIOMÈTRES	72
5.3.1	EXPLICATION DU FONCTIONNEMENT	72
5.3.2	CALIBRATION DES DL6	73
5.3.3	OUVERTURE	76
5.4	SONDES DE TENEUR EN EAU	76
5.4.1	EXPLICATION DU FONCTIONNEMENT	76
5.4.2	CALIBRATION DES 5TM	77
5.5	PLAQUES DE TASSEMENT.....	79
6	CONSTRUIRE LES LYSIMÈTRES ET FAIRE LE CONTRÔLE POUR S’ASSURER DE LA QUALITÉ DE CONSTRUCTION	81
6.1	SOMMAIRE DE LA CONSTRUCTION.....	81
6.2	ÉTAPES DE CONSTRUCTION.....	83
6.3	LEÇONS APPRISSES	84
6.4	ASSURANCE DU CONTRÔLE-QUALITÉ.....	87
7	S’ASSURER LA PERFORMANCE DES COMPOSANTES DES LYSIMÈTRES PENDANT LA PREMIÈRE ANNÉE	90
8	TRAITER ET INTERPRÉTER LES DONNÉES INITIALES FOURNIES PAR LES INSTRUMENTS.....	94
8.1	RÉPONSE GÉNÉRALE DU PLAN EXPÉRIMENTAL	94
8.1.1	RÉSULTATS DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES	94
8.1.2	RÉSULTATS GLOBAUX POUR CHAQUE LYSIMÈTRE	97
8.1.3	RÉSULTATS DES PLAQUES DE TASSEMENT	98
8.2	ANALYSE DES RÉSULTATS	99
8.2.1	ANALYSE DES RÉSULTATS DE TENEUR EN EAU	99
8.2.2	ANALYSE DES RÉSULTATS DE LA SUCCION	102
8.3	RECONSTITUTION DE LA COURBE DE RÉTENTION D’EAU À PARTIR DES DONNÉES DU TERRAIN	106
8.4	APPRENTISSAGES DE LA PREMIÈRE ANNÉE.....	109
8.4.1	INFLUENCE DE LA SATURATION SUR LA LECTURE DES T4E	109
8.4.2	EFFET DE LA RADIATION SOLAIRE	112

8.5	RÉPONSES PRÉLIMINAIRES AUX BESOINS DU PARTENAIRE INDUSTRIEL.....	116
8.5.1	ANALYSE DU TAUX DE PERCOLATION	116
8.5.2	SUIVI CHIMIQUE DES EAUX ET SOLS	120
9	CONCLUSION.....	124
9.1	SOMMAIRE.....	124
9.2	RETOUR SUR LES CONTRIBUTIONS ORIGINALES.....	125
9.3	TRAVAUX FUTURS	126
10	LISTE DES RÉFÉRENCES.....	128
	ANNEXE	134
A.	RÉSULTATS GLOBAUX POUR CHAQUE LYSIMÈTRE.....	134
B.	SUIVI CHIMIQUE DES EAUX ET SOLS	138
C.	RAPPORT DE CONSTRUCTION ENVOYÉ À WASTE MANAGEMENT INC. EN FÉVRIER 2019	141

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma d'un bilan hydrique dans un site d'enfouissement.....	26
Figure 2 : Diagramme de phase d'un sol.....	27
Figure 3 : Forces agissant sur une molécule d'eau à l'interface entre le liquide et l'air.....	28
Figure 4 : Allure générale de la CRE	30
Figure 5 : Courbe de rétention d'eau pour différents types de sol faite selon le répertoire USDA d'Hydrus.....	31
Figure 6 : Fonction de conductivité hydraulique pour différents sols faite selon le répertoire USDA d'Hydrus.....	34
Figure 7 : Schéma d'un lysimètre à tension nulle typique utilisé pour évaluer la performance des recouvrements alternatifs dans le projet ACAP	38
Figure 8 : Comportement hydraulique à la bouche de lysimètres	39
Figure 9 : Principes de conception de lysimètre à tension nulle	40
Figure 10 : Fonction de conductivité hydraulique pour différents débits	41
Figure 11 : Profil de succion selon différents débits	41
Figure 12 : Vue aérienne du site d'enfouissement de St-Nicéphore	46
Figure 13 : Emplacement choisi en 2017 pour la construction du plan expérimental	47
Figure 14 : Stratigraphie typique du recouvrement au-dessus des déchets.....	47
Figure 15 : Coupe de profil avec les instrumentations - L1	49
Figure 16 : Coupe de profil avec les instrumentations - L2	50
Figure 17 : Coupe de profil avec les instrumentations - L3	50
Figure 18 : Coupe de profil avec les instrumentations - L4.....	50
Figure 19 : Fonction de conductivité hydraulique des différents sols avec le taux de percolation déterminé.....	51
Figure 20 : Capture d'écran du modèle avec les conditions de contour	54
Figure 21 : Capture d'écran avec le message d'erreur des conditions initiales de teneur en eau ..	55
Figure 22 : Capture d'écran avec le message d'erreur des conditions de bordure d'écoulement de l'eau.....	55
Figure 23 : Coupe de profil typique d'un enclos de lysimètre	56
Figure 24 : Granulométrie par tamisage.....	59
Figure 25 : Granulométrie par sédimentation	59
Figure 26 : Triangle des textures des sols selon USDA	60
Figure 27 : Courbe granulométrie des sols utilisés pour la construction du plan expérimental	61
Figure 28 : Infiltromètre de type Mini Disk.....	63
Figure 29 : Perméamètre KSAT Meter	63
Figure 30 : Ordre de grandeur de la conductivité hydraulique de divers sols et valeurs des sols étudiés.....	64
Figure 31 : Système Hyprop de Meter.....	65
Figure 32 : Courbe de rétention d'eau des sols utilisés dans ce projet.....	66

Figure 33 : Fonction de conductivité hydraulique des sols utilisés dans ce projet	67
Figure 34 : Localisation des deux stations météorologiques.....	70
Figure 35 : Station météorologique Vantage Pro 2 de DAVIS	70
Figure 36 : Contenant avec auget basculeur.....	71
Figure 37 : Tensiomètre	73
Figure 38 : Courbe de calibration des DL6 en interceptant par zéro	74
Figure 39 : Courbe de calibration des DL6	75
Figure 40 : Sonde de teneur en eau	77
Figure 41 : Courbe de conversion des 5TM.....	79
Figure 42 : Différents éléments de la plaque de tassement	80
Figure 43 : Représentation des plaques de tassement	80
Figure 44 : Quelques personnes ayant contribué à la construction	81
Figure 45 : Vue aérienne du plan expérimental en juin 2018	82
Figure 46 : Vue aérienne du plan expérimental en juillet 2018	82
Figure 47 : Excavation. Chaque base des lysimètres est installée à la même élévation	83
Figure 48 : Installation du géotextile par-dessus la géomembrane	83
Figure 49 : Mise en place des couches de sol	84
Figure 50 : Compaction des couches de sol	84
Figure 51 : Installation de l'instrumentation	84
Figure 52 : Installation d'une plaque de tassement	84
Figure 53 : Installation du drain à la base du pourtour des lysimètres.....	85
Figure 54 : Disposition des tuyaux de drainage	85
Figure 55 : Vue générale du premier drain pour capter les eaux de ruissellement avant de mettre la couche de terre végétale	86
Figure 56 : Vue générale du deuxième drain pour capter les eaux de ruissellement	86
Figure 57 : Connexion des deux drains avant d'être remplie de gravier.....	87
Figure 58 : Réalisation d'un essai de densité de cône de sable	88
Figure 59 : Mélange de sable silteux et de bentonite	88
Figure 60 : Géotextile coupé à 1 m en dessous de la bouche du lysimètre	89
Figure 61 : Barils de récupération du taux de ruissellement avec un contenant à auget basculeur.....	90
Figure 62 : Modifications faites aux tuyaux de récupération du taux de percolation	91
Figure 63 : Modifications faites à la surface des enclos	92
Figure 64 : Fils de connexion d'un Hobo fixé à son poteau	93
Figure 65 : Fils positionnés avec l'identification déterminée en 2018	93
Figure 66 : Données du taux de précipitation pour la période d'analyse.....	96
Figure 67 : Valeurs des lectures des plaques de tassement	98
Figure 68 : Comparaison entre les 2 sondes de teneurs en eau à différentes profondeurs et le taux de précipitation - L2	100
Figure 69 : Comparaison entre les 2 sondes de teneurs en eau à différentes profondeurs et le taux de précipitation - L3	100

Figure 70 : Comparaison entre les 2 sondes de teneurs en eau à différentes profondeurs et le taux de précipitation - L4	101
Figure 71 : Comparaison entre les 2 sondes de teneurs en eau au fond et le taux de percolation - L2	101
Figure 72 : Comparaison entre les 2 sondes de teneurs en eau au fond et le taux de percolation - L3	102
Figure 73 : Comparaison entre les 2 sondes de teneurs en eau au fond et le taux de percolation - L4	102
Figure 74 : Comparaison entre les 2 sondes de succion à différentes profondeurs et le taux de précipitation - L2	103
Figure 75 : Comparaison entre les 2 sondes de succion à différentes profondeurs et le taux de précipitation - L3	103
Figure 76 : Comparaison entre les 2 sondes de succion à différentes profondeurs et le taux de précipitation- L4.....	104
Figure 77 : Comparaison entre les 2 sondes de succion à la bouche du lysimètre et le taux de précipitation - L2	104
Figure 78 : Comparaison entre les 2 sondes de succion à la bouche du lysimètre et le taux de précipitation - L3	105
Figure 79 : Comparaison entre les 2 sondes de succion à la bouche du lysimètre et le taux de précipitation - L4.....	105
Figure 80 : CRE reconstituée du matériau de recouvrement	106
Figure 81 : Fonction de conductivité hydraulique pour le matériau de recouvrement	107
Figure 82 : CRE reconstituée du sol contaminé de catégorie AB et BC à partir des données de 2018 et une partie de 2019	108
Figure 83 : Méthode de saturation des T4 à l'aide d'une seringue	109
Figure 84 : Données de succion pour les 4 lysimètres pour 2018.....	110
Figure 85 : Méthode de saturation des T4 à l'aide d'une seringue et de la pompe à vide	111
Figure 86 : Données de succion pour les 4 lysimètres pour 2019.....	112
Figure 87 : Oscillations causées par la radiation solaire et données météorologiques	113
Figure 88 : Succion et radiation pour 24 heures pour deux journées ayant un écart important de radiation.....	113
Figure 89 : Boîte de protection des DL6	114
Figure 90 : Protections supplémentaires sur les boîtes de protection des DL6.....	114
Figure 91 : Présence d'oscillation pendant le jour après l'ajout des protections	115
Figure 92 : Taux de percolation pour la période d'analyse du 29-06-2018 au 28-06-2019.....	117
Figure 93 : Taux de percolation pour la période d'analyse à l'automne 2018.....	117
Figure 94 : Taux de percolation pour la période d'analyse au printemps 2019	118
Figure 95 : Taux de percolation cumulatif pour la période d'analyse du 29-06-2018 au 28-06-2019	118
Figure 96 : Auscultation par vidéo du tuyau de sortie du L2	119

Figure 97 : Baril pour récupérer les eaux de surface.....	120
Figure 98 : Données du taux de précipitation, taux de percolation, teneur en eau et succion - L1	135
Figure 99 : Données du taux de précipitation, taux de percolation, teneur en eau et succion -L2	135
Figure 100 : Données du taux de précipitation, taux de percolation, teneur en eau et succion - L3	136
Figure 101 : Données du taux de précipitation, taux de percolation, teneur en eau et succion - L4	136
Figure 102 : Données de teneur en eau pour les sondes à la surface pour tous les lysimètres	137

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Résumé des critères génériques et de l'autorisation de l'utilisation comme recouvrement final.....	45
Tableau 2 : Valeurs des hauteurs potentielles des parois des lysimètres.	52
Tableau 3 : Densité des particules solides et nomenclature des sols utilisés pour la construction du plan expérimental	61
Tableau 4 : Valeurs du coefficient de perméabilité saturée	63
Tableau 5 : Valeurs des paramètres hydrauliques obtenus en laboratoire	67
Tableau 6 : Identification des sondes de teneur en eau et des tensiomètres.....	69
Tableau 7 : Constante de conversion des DL6.....	74
Tableau 8 : Valeurs du R carré des divers sols pour les différentes courbes de tendance	78
Tableau 9 : Détails des périodes de non-enregistrement pour les stations météorologiques	95
Tableau 10 : Pourcentage du taux de percolation en fonction des précipitations annuelles	119
Tableau 11 : Fréquence des prises d'échantillon sur le terrain pour 2018.....	121
Tableau 12 : Fréquence des prises d'échantillon sur le terrain pour 2019	121
Tableau 13 : Résultats de la contamination des eaux de ruissellement pour L1&L2	122
Tableau 14 : Résultats de la contamination des eaux de ruissellement pour L3	122
Tableau 15 : Résultats de la contamination des eaux de ruissellement pour L4	123
Tableau 16 : Périodes de non-enregistrement pour les EM50	134
Tableau 17 : Date de début et de fin d'acquisition des données pour les DL6	134
Tableau 18 : Détails des périodes de non-enregistrement pour les Hobos.....	134
Tableau 19 : Résultats de la contamination des sols pour L1&L2.....	138
Tableau 20 : Résultats de la contamination des sols pour L3	139
Tableau 21 : Résultats de la contamination des sols pour L4	140

1 INTRODUCTION

Cette première partie permet de mettre en contexte le travail réalisé dans le cadre de ce projet de maîtrise, de détailler les problématiques, de formuler des questions de recherche, de définir les objectifs, d'énoncer les hypothèses, de décrire les contributions originales pour la communauté scientifique et finalement, d'exposer la structure du présent document.

1.1 MISE EN CONTEXTE

La géotechnique environnementale est un domaine précis de la mécanique des sols. Elle intègre les principes de géotechnique à la gestion des résidus autant dans les sites d'enfouissement que dans les parcs à résidus miniers. Elle permet d'évaluer la migration des contaminants dans le sol, de choisir et de développer des méthodes de traitement pour la décontamination des sols et de concevoir des sites d'enfouissement durable [Université de Sherbrooke, 2018].

La gestion adéquate des matières résiduelles est essentielle pour s'assurer de la protection de l'environnement et ainsi fournir un milieu de vie agréable pour les populations actuelles et futures. Comme mentionné par Zornberg et McCartney [2007], la gestion des matières résiduelles permet d'en disposer et de les isoler pour minimiser les contacts avec l'environnement et les humains. Au Québec, en 2015, la quantité de matières résiduelles éliminées est de 5 120 000 tonnes [RECYC-QUÉBEC, 2015]. Toujours pour la même période, il existait 82 lieux d'éliminations en activité. Ces lieux sont de différents types, c'est-à-dire des lieux d'enfouissement technique, des lieux d'enfouissement de débris de construction et démolition, des incinérateurs et des lieux d'enfouissement en tranchées. À noter que les lieux d'enfouissement technique possèdent la proportion la plus importante avec 48 %.

La conception et la construction des sites d'enfouissement technique sont deux aspects importants à considérer pour s'assurer de la disposition adéquate des matières résiduelles et pour garantir leur gestion durable. Le Gouvernement du Québec a le rôle de réglementer la conception des sites d'enfouissement. De 1978 à 2005, le règlement sur les déchets

solides (RDS) était en vigueur. À partir de 2005, ce règlement a été remplacé par le règlement sur l'enfouissement et l'incération de matières résiduelles (REIMR) [Gouvernement du Québec, 2018a]. Les principaux défis de conception sont de contrôler l'eau dans l'idée d'empêcher son entrée dans le site (influence la production de lixiviat), de réduire et de contrôler les émissions de biogaz et de permettre une adéquation avec l'environnement en assurant la végétalisation du site après l'exploitation.

Les sites d'enfouissement technique possèdent des systèmes de drainage, de captage de biogaz ainsi que de lixiviat. Également, une attention particulière est portée pour la conception du recouvrement final dans l'objectif de réduire les émissions de biogaz et la quantité d'eau qui percole dans le recouvrement. À noter que dans le cadre de ce mémoire, une distinction est faite entre le terme « infiltration » qui réfère à l'eau présente en surface dans le sol et le terme « percolation » qui renvoie à l'eau qui descend vers les déchets, c'est cette eau qui formera éventuellement le lixiviat.

Dans un autre ordre d'idées, les biogaz sont produits suite à la biodégradation des matières organiques enfouies dans les sites d'enfouissement. Suite à cette réaction chimique, les principaux produits de dégradation sont le dioxyde de carbone (CO_2), l'eau et chaleur lorsqu'elle est réalisée dans des conditions aérobiques et ils sont le méthane (CH_4) et le CO_2 pour un processus anaérobie. Puis, à rappeler lorsque ces deux derniers produits (CH_4 et CO_2) sont relâchés dans l'atmosphère, ils contribuent au réchauffement planétaire, comme ils constituent des gaz à effet de serre (GES) [Pipatti, 2019]. En 2017, les sites d'enfouissement ont produit 19 Mt d'éq CO_2 , ce qui correspond à 2,6 % des émissions émises au Canada [Gouvernement du Canada, 2019]. Sans nul doute, il est donc important que les sites d'enfouissement possèdent un recouvrement final et un système de captage des biogaz afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre.

En ce qui concerne le lixiviat, il est en grande partie formé par l'eau provenant de la pluie ou de la fonte de la neige qui percolent dans les matières résiduelles enfouies. Suite à ce contact, l'eau possède alors des concentrations importantes en composés organiques et inorganiques. Puis, elle s'accumule au fond du site où elle est pompée [El Hassni, 2016]. De toute évidence, vu la contamination élevée du lixiviat, cette eau ne peut pas être rejetée dans l'environnement sans traitement. En effet, si elle est mal gérée, elle peut être nocive

pour l'environnement en contaminant les eaux souterraines et de ruissellement [McCartney et Zornberg, 2004]. À noter que la composition du lixiviat varie selon la nature des matières résiduelles enfouies, la quantité d'eau percolée, les conditions d'enfouissement, etc. En bref, le recouvrement final d'un site d'enfouissement joue un rôle important dans le contrôle de l'apport en eau.

En ce sens, la conception du recouvrement d'un site d'enfouissement est une étape clé pour réduire la contamination de l'air, des sols et de l'eau potentiellement faite par les biogaz et le lixiviat. Il est alors conçu de plusieurs couches, chacune exerçant une fonction déterminée. Par exemple, la couche supérieure est un support à la végétation et permet de contrôler de l'érosion, une couche de protection est prévue contre les animaux et les racines des arbres, une couche imperméable qui contrôle les infiltrations est installée, une couche de captage des biogaz est présente. Ces couches sont placées au-dessus des matières résiduelles et chacune d'entre elles possède des caractéristiques physiques et hydrauliques différentes en fonction de leur rôle. De plus, le recouvrement final possède une pente pour favoriser le drainage des eaux [Gouvernement du Québec, 2018a]. En d'autres mots, une conception adéquate du recouvrement des sites d'enfouissement permet à long terme de réduire les impacts environnementaux.

Un autre aspect qu'il est important de mettre en contexte pour bien illustrer la réalité des sites d'enfouissement est la gestion des sols contaminés. Effectivement, les sols contaminés sont acheminés vers les sites d'enfouissement, lorsqu'il n'est plus viable économique de le décontaminer. À noter que depuis les 15 dernières années, la production des sols contaminés a augmenté de 8 % au Québec. Conséquemment, l'enfouissement des sols contaminés s'est également accru [Le Courrier Sud, 2018]. Les sols sont classifiés en fonction de leurs différents niveaux de contamination. Cette classification est établie selon les critères émis par le Gouvernement du Québec, selon le règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains (RPTR). La nomenclature adoptée au Québec est basée sur une classification divisée selon 3 niveaux, soit l'A, B et C, l'important à comprendre est qu'un sol A est moins contaminé qu'un sol C [Gouvernement du Québec, 2018b].

1.2 PROBLÉMATIQUE

Ce projet de recherche se déroule en collaboration avec le partenaire industriel Waste Management Inc. qui exploite le site d'enfouissement de St-Nicéphore. Il est à noter que ce site possède des problèmes d'infiltration et de gestion des sols contaminés. Cette sous-section présente les besoins du partenaire industriel ainsi que la solution adoptée dans le cadre de ce travail de mémoire.

1.2.1 Besoins du partenaire industriel

D'une part, une partie du recouvrement final de ce site d'enfouissement a été construit dans les années 90 selon la législation de 1978, soit le règlement sur les déchets solides (RDS). Dans ce cas, le sol utilisé pour le recouvrement final possède une forte perméabilité. Un autre aspect qui influence les infiltrations dans le recouvrement est les tassements différentiels, ce qui nuit au bon drainage du site. En effet, ce phénomène crée des concavités qui causent des fissures de traction qui laissent passer de l'eau dans le recouvrement de manière continue [Olivier, 2005]. En d'autres termes, la situation actuelle du recouvrement a comme conclusion qu'il y a beaucoup d'infiltrations et, par conséquent, un taux de percolation élevé, ce qui se traduit par une importante production de lixiviat. Le premier besoin du partenaire industriel est alors la réduction des infiltrations causées par les précipitations dans le recouvrement de cette partie du site.

D'une autre part, le site reçoit une quantité importante de sols contaminés caractérisés BC. L'article 50 du règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (REIMR) précise que seulement les sols, dont les contaminants en concentration égale ou inférieure aux valeurs limites fixées à l'annexe I du règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains peuvent être utilisés comme recouvrement final [Gouvernement du Québec, 2018b]. En d'autres termes, il n'est pas permis d'utiliser des sols contaminés de catégorie BC comme matériau de construction pour le recouvrement final. Toutefois, l'article 42 du REIMR précise que ces sols peuvent être utilisés comme recouvrement journalier et que l'épaisseur de la couche ne peut pas excéder 60 cm [Gouvernement du Québec, 2018a]. Par conséquent, les quantités excédentaires de sols contaminés de catégorie BC reçus sur le site sont enfouies. Cette situation réduit alors l'espace disponible

pour l'enfouissement des matières résiduelles et conséquemment, elle diminue l'efficacité du site. Pour cette raison, le deuxième besoin du partenaire industriel est de permettre l'utilisation des sols contaminés de catégorie BC dans le recouvrement final afin de rendre de nouveau disponible ce volume pour l'enfouissement sanitaire. De plus, en ce qui a trait au volet scientifique, aucune documentation scientifique n'a été trouvée à ce sujet.

1.2.2 Solution proposée

Une solution pour remédier à cette problématique est de réaliser un profillement du recouvrement. Alors, ce projet de recherche vise à ajouter des sols, dont des sols contaminés au-dessus du recouvrement existant dans l'intérêt de réduire les infiltrations dans ce dernier, et ainsi modifier la production de lixiviat. Autrement dit, plusieurs configurations de recouvrement seront réalisées avec différents types de sol.

Cette possibilité de profillement est envisageable, car la réglementation de 1978 émettait une élévation maximale pour le recouvrement et avec le temps, cette hauteur admissible s'est abaissée par le tassement des déchets. C'est pourquoi qu'il est désormais possible de combler cette différence d'élévation en ajoutant des couches de sol sur le recouvrement actuel.

Cette solution permet d'uniformiser la surface, ce qui permet de rétablir les pentes de drainage favorisant le bon ruissellement. Notamment, l'ajout éventuel des sols permet de remplir les fissures de traction réduisant ainsi les infiltrations dans le recouvrement. De plus, cette solution permet possiblement de réduire la perméabilité du recouvrement, car les sols utilisés peuvent avoir un coefficient de perméabilité plus grand que ceux présents actuellement dans le recouvrement du site d'enfouissement de la section étudiée. Également, l'ajout des sols peut modifier le drainage du recouvrement actuel, s'il y a la création de barrières capillaires. Dans un autre ordre d'idées, cette situation permet d'utiliser des sols contaminés de catégorie BC comme matériau de construction, ce qui permet leur valorisation et parallèlement de rendre de nouveau disponible de l'espace pour l'enfouissement de déchets.

1.3 QUESTIONS DE RECHERCHE

Les principes clés élaborés dans les sections précédentes s'articulent principalement autour de l'infiltration causée par les précipitations et la gestion des sols contaminés dans le site d'enfouissement. Ainsi, à la lumière de ces concepts, il est possible de formuler une question de recherche générale pour ce projet :

Est-ce qu'un profillement avec différents types de sol, dont des sols contaminés sur le recouvrement du site d'enfouissement de St-Nicéphore peut réduire les infiltrations causées par les précipitations et conséquemment la production de lixiviat ?

À noter que cette question de recherche permet de répondre à l'ensemble des besoins du partenaire industriel. Il est important de savoir que la durée prévue pour ce projet est de trois ans, mais que le travail fait dans le cadre d'une maîtrise est plus court généralement de deux ans. Conséquemment, il faut déterminer la proportion du travail qui sera réalisable selon la durée accordée. La définition de ce travail de maîtrise s'articule alors autour de la réalisation et du suivi de la méthode utilisée pour étudier les infiltrations dans le recouvrement. Par conséquent, la question de recherche liée à ce travail se définit comme suit :

Comment peut-on planifier, instrumenter et construire des lysimètres et valider le fonctionnement des différentes composantes pour atteindre les objectifs de ce projet de recherche ?

1.4 OBJECTIFS

Afin de répondre adéquatement aux deux questions de recherche précisées précédemment, la formulation des objectifs de recherche et de ce projet de maîtrise est importante. Les objectifs de recherche se résument à un objectif principal qui se divise en deux spécifiques. Cette subdivision fait en sorte que lorsque les objectifs spécifiques sont atteints, le principal l'est aussi. En ce qui concerne ceux liés à ce projet de maîtrise, ils sont présentés sous forme d'énumération et correspondent aux tâches accomplies.

1.4.1 Objectifs de recherche

L'objectif principal est d'étudier le taux de percolation dans un recouvrement alternatif incluant des sols contaminés afin de réduire les infiltrations causées par les précipitations et ainsi modifier la production de lixiviat. Le premier objectif spécifique est d'analyser les différentes configurations de sol permettant le profillement du recouvrement afin de réduire les infiltrations. Cette approche permet d'évaluer la performance des différentes configurations dans l'objectif de déterminer celle qui offre la plus grande diminution des infiltrations. Pour atteindre cet objectif, il faut connaître la quantité d'eau percolée dans le recouvrement et celle de l'eau ruisselée. Le second objectif spécifique est d'évaluer la possibilité d'utiliser des sols contaminés de catégorie BC comme matériau de construction. Autrement dit, il faut déterminer si l'ajout de ce sol sur le recouvrement actuel influence l'environnement à proximité. Pour se faire, il faut connaître la quantité et la qualité de l'eau ruisselée des différentes configurations de sol. Les résultats obtenus sont alors comparés avec la législation québécoise.

1.4.2 Objectifs de ce travail de maîtrise

Les différents objectifs de ce travail de maîtrise explicitent la variété de tâches réalisées. Les travaux se sont déroulés en partie en laboratoire, sur le terrain et en bureau. L'énumération suivante présente l'ensemble des étapes à accomplir.

1. Effectuer la conception et la planification du plan expérimental
2. Déterminer les propriétés physiques et hydrauliques des matériaux utilisés
3. Vérifier la conformité et calibrer les instruments
4. Construire les lysimètres et faire le contrôle pour s'assurer de la qualité de construction
5. Développer une procédure standard d'opération du plan expérimental
6. S'assurer de la performance des composantes des lysimètres pendant la première année
7. Traiter et interpréter les données initiales fournies par les instruments

1.5 HYPOTHÈSES

Comme précisé précédemment, pour étudier les infiltrations dans le recouvrement alternatif du site d'enfouissement, il faut connaître la quantité d'eau infiltrée. Pour y parvenir, la littérature stipule que le lysimètre est l'outil le plus fiable pour effectuer le suivi des infiltrations [Benson et *al.*, 2001]. Partant de ce fait, la première hypothèse formulée pour ce projet de maîtrise est que le lysimètre est l'outil le plus adéquat pour quantifier les infiltrations dans le recouvrement. De plus, il est à noter que la littérature suggère plusieurs méthodes de conception pour les lysimètres. Cependant, considérant les critères de conception et la réalité des sols non saturés dans le recouvrement du site d'enfouissement, la seconde hypothèse est que la méthode développée par Parent et *al.* [Parent et *al.*, 2006] est la meilleure. Dans l'objectif de valider ces hypothèses, des sondes de teneur en eau et des tensiomètres (mesure de succion) sont installés pour fournir des informations complémentaires aux comportements de lysimètres. Par exemple, ils vont donner des données permettant de vérifier le fonctionnement adéquat du lysimètre, d'analyser l'effet de diversion latérale, à savoir s'il y a la présence d'une barrière capillaire à la base du lysimètre [Benson et *al.*, 2001], etc.

Une hypothèse formulée liée à l'utilisation des sols contaminés dans le recouvrement est que les sols contaminés ne vont pas entraîner une contamination de surface. Pour appuyer cette affirmation, il faut s'assurer que les eaux et les sols échantillonnés en surface ont une contamination nulle ou en dessous des paramètres émis par la législation du Québec.

1.6 CONTRIBUTIONS ORIGINALES

D'une part, il existe un manque évident d'informations dans la littérature scientifique au niveau des infiltrations dans le recouvrement des sites d'enfouissement du Québec. Alors, ce projet permet de documenter davantage cet aspect. Également, l'intérêt de ce projet de recherche est de consolider les techniques de conception des lysimètres. Il en découle alors une contribution originale concernant la validation du concept théorique de conception des lysimètres développé par Parent et *al.* [2006].

D'une autre part, l'utilisation des sols contaminés de catégorie BC comme matériau de construction dans le recouvrement des sites d'enfouissement n'est pas permise à l'heure actuelle. Par conséquent, l'objectif de ce projet de recherche est d'étudier la possibilité de cette utilisation sans causer une contamination de surface en périphérie du site d'enfouissement. À savoir qu'il est difficile de prédire les retombées de ce projet, puisqu'il s'agit d'un premier projet de recherche dans ce domaine et que la législation québécoise concernant les sites d'enfouissement est impliquée. Cependant, si cette méthode s'avère concluante, elle s'agit d'une éventualité intéressante pour modifier les conditions de drainage du recouvrement d'un site d'enfouissement à faible coût. Également, cette valorisation permet une diminution de l'exportation des ressources naturelles pour la construction des recouvrements finaux des sites d'enfouissement.

1.7 STRUCTURE DU DOCUMENT

Ce mémoire est structuré selon les objectifs de ce travail de maîtrise évoqués à la section 1.3 et le contenu des chapitres est divisé de la manière suivante :

- Le chapitre 2 expose les connaissances théoriques et techniques impliquées dans ce projet de recherche. Les thèmes abordés sont relatifs au bilan hydrique, aux généralités des milieux poreux, les méthodes d'estimation des infiltrations et la situation actuelle des sols contaminés au Québec.
- Le chapitre 3 présente les aspects liés à la conception et à la planification. Il contient également les détails des simulations numériques, soit une explication du logiciel utilisé, les éléments initiaux d'entrée et la présentation des résultats.
- Le chapitre 4 fournit les particularités de la détermination des propriétés physiques et hydrauliques des matériaux utilisés réalisée en laboratoire.
- Le chapitre 5 expose les informations liées à la vérification de la conformité et de la calibration des instruments. Cinq différents types d'instruments ayant tous un rôle distinct ont été installés au sein du plan expérimental.
- Le chapitre 6 aborde les éléments concernant la construction des lysimètres et le contrôle pour s'assurer de la qualité de construction. À savoir que ce chapitre est un résumé du contenu du rapport transmis au partenaire industriel en février 2019.

- Le chapitre 7 présente la procédure standard d'opération du plan expérimental qui a été développé au sein de l'équipe pour s'assurer de la bonne gestion et le traitement efficace de ces millions de données.
- Le chapitre 8 traite des réparations et des améliorations effectuées pour vérifier la performance des composantes des lysimètres après la première année.
- Le chapitre 9 concerne la présentation des données expérimentales prises *in situ* pour l'année 2018 et une partie de 2019, l'interprétation et l'analyse de ces dernières.
- Le chapitre 10 permet de réaliser la synthèse des éléments traités dans ce mémoire. Autrement dit, il présente un sommaire des travaux réalisés, permet un retour sur les contributions originales et discute des nouvelles perspectives de recherche.

2 ÉTAT DE L'ART

Cette section présente les connaissances théoriques et techniques impliquées dans ce projet de recherche. En ce qui concerne les aspects théoriques, ils s'articulent autour du bilan hydrique et des généralités des milieux poreux pour bien comprendre le contexte scientifique. Par la suite, les notions techniques font référence aux méthodes d'estimation du taux de percolation dans le recouvrement d'un site d'enfouissement ainsi qu'à la situation actuelle des sols contaminés au Québec. Ces éléments théoriques et techniques visent à situer le projet de recherche par rapport aux travaux précédents afin de répondre à la problématique présente sur le site d'enfouissement de St-Nicéphore.

2.1 BILAN HYDRIQUE

Le bilan hydrique consiste à une combinaison entre des données mesurées et estimées qui permet d'obtenir le taux de percolation [Benson et *al.*, 2001]. Cette méthode utilise une approche équivalente à l'équation de conservation de la masse qui est basée sur le principe de conservation de la masse au sein d'un système [Zornberg et McCartney, 2007]. La méthode du bilan hydrique est exprimée selon l'équation suivante :

$$P_r = P - ET - R - \Delta S \quad \text{Équation 1}$$

Où,

- P_r : *taux de percolation*
- P : *taux de précipitation*
- ET : *taux d'évapotranspiration*
- R : *taux de ruissellement*
- ΔS : *taux d'emmagasinement dans le sol*

Comme expliqué dans l'article de Benson et *al.* [2001], il existe une incertitude considérable pour l'obtention des variables permettant de calculer le taux de percolation directement. En effet, sous des conditions idéales, c'est-à-dire sans vent, sans neige, les mesures du taux de précipitation possèdent une précision de moins de 10 %. Le taux d'évapotranspiration ne peut pas être mesuré directement, il en découle alors des erreurs importantes sur la précision et l'exactitude lors de l'estimation. À noter que le taux

d'évapotranspiration implique l'évaporation du sol ainsi que la transpiration des plantes, il est alors fonction du climat et du type de plantes poussant sur le sol étudié. Également, il existe des différences d'estimation du taux de ruissellement entre un climat aride et humide. Pour un climat humide, l'estimation est plus précise que pour un semi-aride climat. Selon Benson et al. [2001], cette estimation est faite à partir de la méthode semi-empirique du coefficient d'écoulement (curve number method) développée par SCG (Soil Conservation Service) [Cronshey,1986].

Puis, le taux d'emmagasinement est influencé par la teneur en eau et la granulométrie du sol [Benson et *al.*, 2001]. En bref, la détermination du taux de percolation est complexe à obtenir.

La figure 1 présente schématiquement un bilan hydrique d'un site d'enfouissement, soit les différents taux impliqués. À noter que l'eau qui percole dans le site d'enfouissement rentre en contact avec les matières résiduelles et se transforme en lixiviat (sera pompé et traité). Comme mentionné précédemment, l'application directe de l'équation du bilan hydrique entraîne des erreurs importantes. Par conséquent, le taux de percolation peut être obtenu à l'aide d'autres méthodes directes, par exemple les lysimètres. Également, comme le recouvrement d'un site d'enfouissement contient une fraction d'air et d'eau vu son interaction avec l'atmosphère, il est considéré comme étant un sol non saturé. Ces concepts sont expliqués en détail dans les prochaines sections de ce chapitre.

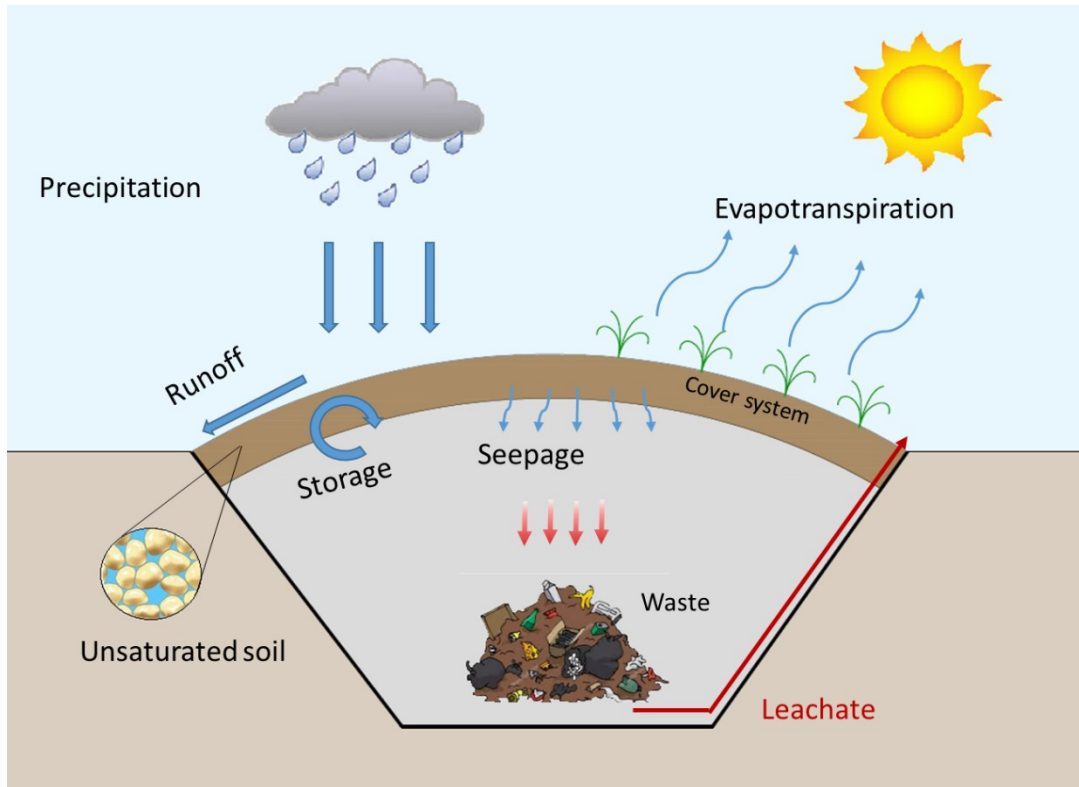


Figure 1 : Schéma d'un bilan hydrique dans un site d'enfouissement

2.2 GÉNÉRALITÉS DES MILIEUX POREUX

La terminologie des milieux poreux provient du concept que le matériau solide contienne des pores qui sont remplis par des fluides liquides ou gazeux. Dans la réalité des sites d'enfouissement, les sols présents dans le recouvrement final du site sont généralement des sols qui sont dits non saturés, il est donc pertinent de comprendre leur comportement grâce à l'explication des différents concepts. Par exemple, les relations de phase dans les milieux poreux non saturés, les effets des remontées capillaires, le potentiel hydraulique, la courbe de rétention d'eau, la fonction de conductivité hydraulique et les barrières capillaires sont expliquées en détail dans cette sous-section.

2.2.1 Relations de phase dans les milieux poreux non saturés

Les sols sont constitués d'un ensemble de particules solides entourées de vides. En effet, les particules solides sont des grains minuscules de différents minéraux et les vides sont des pores qui peuvent être remplis d'eau, d'air ou la combinaison des deux en proportions

variables [Holtz, 1991]. Le diagramme des phases présenté à la figure 2 illustre les différentes relations entre l'état solide (matrice du sol), l'état liquide (eau) et l'état gazeux (air). En d'autres termes, un sol est considéré comme non saturé lorsque ses pores ne sont pas complètement remplis d'eau.

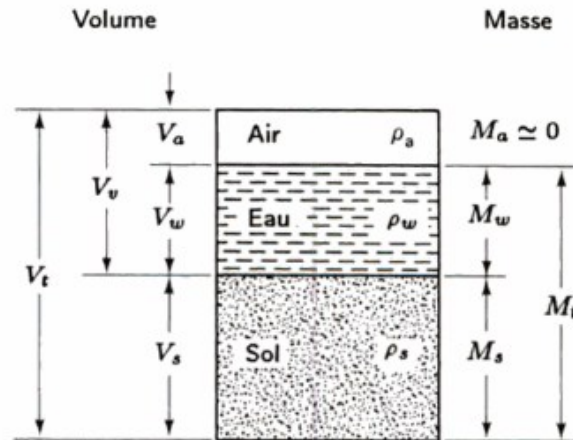


Figure 2 : Diagramme de phase d'un sol
[Source : Holtz, 1991]

À partir des volumes et des masses des trois différentes phases, il est possible de les mettre en relation pour obtenir des combinaisons couramment utilisées dans le domaine de la géotechnique. Par exemple, l'indice des vides (e) est le quotient du volume des vides (V_v) et du volume des grains solides (V_s) tandis que la porosité est le pourcentage du volume des vides sur le volume total de l'échantillon de sol (V_t). À propos de la saturation (S_r), elle est le pourcentage du volume des vides occupés par l'eau (V_w) sur le volume des vides (V_v). En ce qui concerne la teneur en eau, elle se divise en deux catégories : 1) la teneur en eau gravimétrique (ω) qui est le pourcentage de la masse d'eau (M_w) sur la masse des grains solides (M_s) et 2) la teneur en eau volumétrique (θ) qui est le pourcentage du volume d'eau dans les pores (V_w) sur le volume total du sol (V_t).

La masse volumique est également un principe très utile dans le domaine de la géotechnique. Par définition, il s'agit du rapport entre les masses et les volumes du diagramme de phase. Celles fréquemment utilisées sont la masse volumique totale (ρ) qui est la masse totale (M_t) divisée par le volume total (V_t) et la masse volumique sèche qui est le quotient de la masse des grains solides (M_s) et du volume total (V_t) [Holtz, 1991].

2.2.2 Effets des remontées capillaires dans les milieux poreux non saturés

La présence d'eau dans les sols explique les effets de remontées capillaires. Ce phénomène de capillarité résulte de l'existence d'une tension superficielle qui se développe à l'interface des matériaux. En effet, à l'interface entre une phase liquide et une gazeuse, les molécules sont soumises à un ensemble de forces d'interaction non équilibrées. La figure 3 présente la différence de symétrie entre les forces pour une molécule d'eau à l'interface eau-air et celles pour une molécule dans l'eau. Il est évident que pour la molécule d'eau à l'interface eau-air, il n'y a pas de symétrie sphérique.

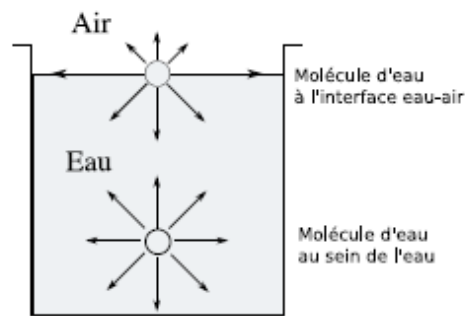


Figure 3 : Forces agissant sur une molécule d'eau à l'interface entre le liquide et l'air
[Source : Gras, 2013]

Par conséquent, afin que l'interface eau-air soit à l'équilibre, une tension élastique est générée [Gras, 2013]. À noter que la hauteur d'ascension est inversement proportionnelle au diamètre des vides du sol ; plus le diamètre est petit, plus la hauteur d'ascension sera grande. En d'autres termes, plus les pores sont fins, plus la remontée capillaire est grande [Holtz, 1991]. Puis, la succion découle du principe de capillarité. En effet, la succion est définie comme une énergie potentielle qu'il convient de fournir pour déplacer une quantité d'eau retenue par les forces d'attraction capillaires [Hoang, 2017].

2.2.3 Potentiel hydraulique

L'écoulement dans les sols non saturés est un principe important qui permet de comprendre ce qui se produit à l'intérieur des pores. Darcy [1856] a montré que pour un écoulement laminaire le débit d'eau dans un sable propre était proportionnel au gradient hydraulique. À savoir que le coefficient de perméabilité fait référence à la perméabilité d'un sol qui est

fonction de la nature minéralogique et de la taille des grains. Cette relation se traduit alors par la loi de Darcy :

$$Q = -KiA \quad \text{Équation 2}$$

Où,

- Q : débit (m^3/s)
- K : coefficient de perméabilité
- i : gradient hydraulique qui se définit par la perte de charge
par unité de longueur
- A : aire de la section perpendiculaire à l'écoulement (m^2)

2.2.4 Courbe de rétention d'eau

La courbe de rétention d'eau (CRE) est une caractéristique importante pour un matériau poreux. Elle est une relation de base utilisée pour prédire le comportement mécanique et hydraulique de milieux poreux non saturés en géotechnique et en sciences des sols. Cette courbe met en relation la teneur en eau volumétrique et la succion sur une échelle logarithmique.

À savoir que la non-linéarité de la courbe est due aux intervalles de la distribution des pores dans le matériau. Également, elle est divisée en trois phases selon les différents états de saturation (voir figure 4) :

1. Le plateau de gauche correspond à la valeur de teneur en eau de saturation (θ_s). La courbe demeure constante, malgré la succion appliquée jusqu'à la valeur d'entrée d'air (Ψ_{VEA}), une caractéristique importante de la CRE [Zornberg et McCartney, 2007].
2. Une fois que la valeur d'entrée d'air est atteinte, la teneur en eau chute lorsque la succion augmente. Cette situation est présentée par la pente négative qui correspond à la phase de désaturation (λ).
3. Le dernier plateau est la tendance vers la teneur en eau résiduelle (θ_r), donc malgré l'augmentation de la succion, la teneur en eau demeure constante. À

noter que cette condition résiduelle est due au fait que l'eau devient obstruée (ou déconnectée) dans les pores du sol [Zornberg et McCartney, 2007].

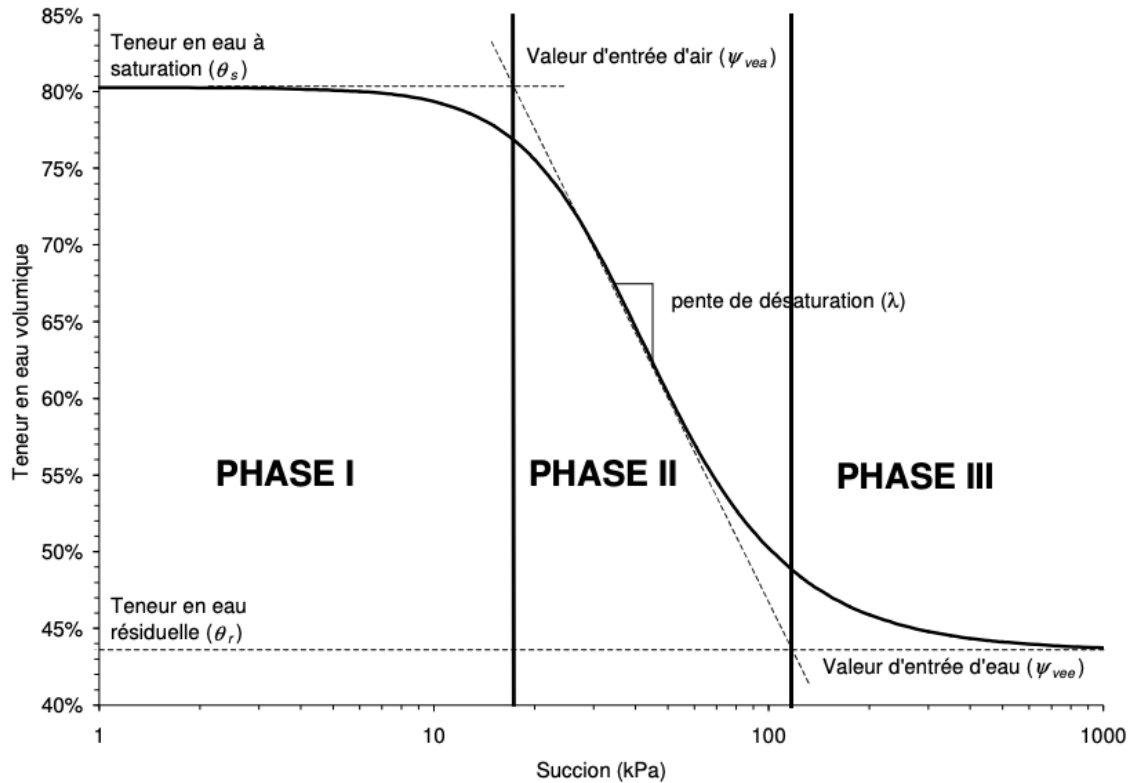


Figure 4 : Allure générale de la CRE
[Source : Parent, 2003]

Fredlund et Xing [1994] proposent de déterminer la valeur d'entrée d'air en prolongeant la ligne horizontale du plateau de saturation et celle de la phase de désaturation. La valeur obtenue à cette intersection permet alors d'estimer la succion à partir de laquelle un matériau commence à se désaturer. En d'autres termes, il s'agit de la valeur où il y a une perte d'eau significative dans les grands pores d'un échantillon. À savoir que les courbes de CRE ne sont pas reliées à la granulométrie, mais plutôt à la porométrie, c'est-à-dire la distribution de la dimension des pores et à la compressibilité du matériau [Smith et Mullins, 2001]. Conséquemment, un changement de volume influence l'allure de la CRE.

Un exemple traitant de l'influence de la porométrie est présenté à la figure 5. Cette figure illustre trois différentes CRE. Suite à son analyse, il est possible de constater qu'un sol argileux, où les pores sont petits, se désature graduellement pour de grandes valeurs de

succion tandis qu'un sol sableux se désature brusquement, vu la plus grande taille de ses pores pour de faibles valeurs de succion.

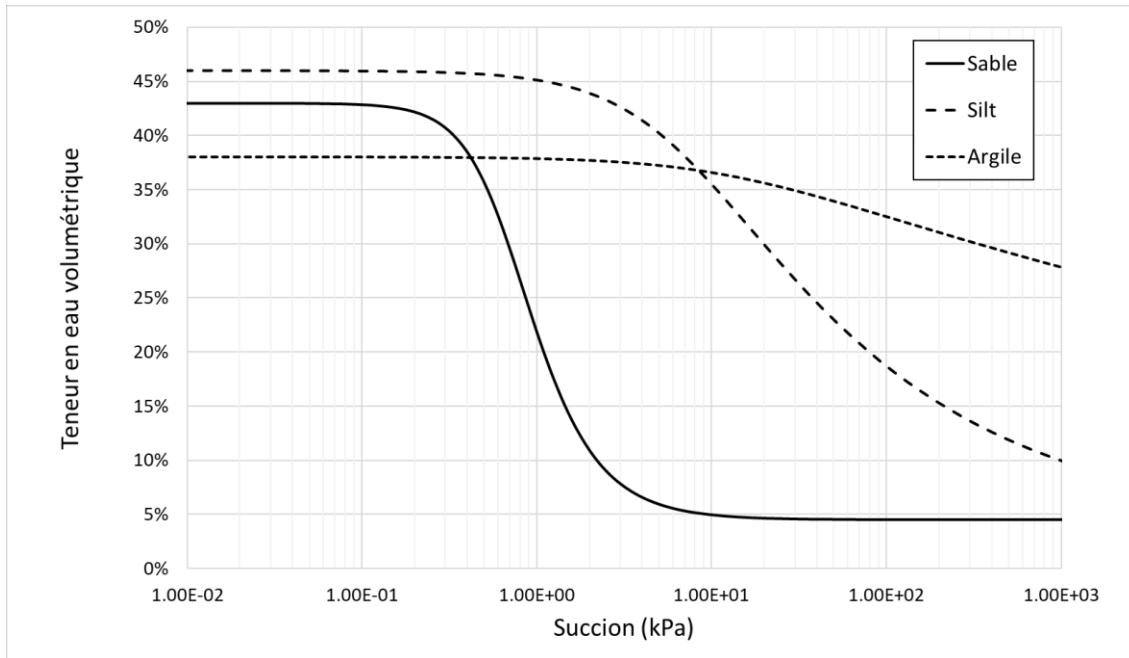


Figure 5 : Courbe de rétention d'eau pour différents types de sol faite selon le répertoire USDA d'Hydrus

La courbe de rétention d'eau peut être obtenue en laboratoire grâce à différents équipements. Effectivement, plusieurs techniques sont disponibles pour déterminer la CRE de manière expérimentale [Klute et Dirksen, 1986 ; Wang et Benson, 2004]. Des techniques dites physiques et thermodynamiques peuvent être aussi utilisées pour l'obtention de cette courbe. Les techniques physiques impliquent un matériau initialement saturé en eau duquel l'eau est lentement expulsée en imposant une aspiration à la limite d'un échantillon [Zornberg et McCartney, 2007]. Tandis que les techniques thermodynamiques consistent à laisser l'eau s'évaporer d'un échantillon dans une chambre fermée sous une humidité relative contrôlée. À savoir que la détermination de la CRE prend un temps considérable selon la méthode utilisée et le type de sol étudié.

En l'absence de résultats de laboratoire, l'utilisation de méthode d'estimation peut être utilisée pour l'obtention de la CRE. Par exemple, le modèle développé par Arya et Paris [1981] permet d'estimer la CRE à partir de la courbe granulométrique et de la densité.

La seconde étape de ce modèle est le lissage de la courbe granulométrique avec le modèle de Fredlund et *al.* [2000] :

$$\theta(\psi) = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{\alpha} \right)^n \right]^m \right\}} C(\psi) \quad \text{Équation 3}$$

Où,

- $\theta(\psi)$: teneur en eau en fonction de la succion
- θ_s : teneur en eau saturée
- e : indice des vides
- $\alpha, n, \text{ et } m$: paramètres de van Genuchten
- $C(\psi)$: paramètre pour forcer la courbe à tendre vers 0, définit comme :

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)}$$

- ψ_r : paramètre d'ajustement pour la tendance vers 0

Ces résultats obtenus en laboratoire ou selon une estimation doivent être lissés selon l'un des différents modèles : Brooks et Corey [1946], van Genuchten [1980] et Fredlund et Xing [1994]. Le modèle de lissage le plus couramment utilisé est celui de van Genuchten [1980] parce qu'il permet l'application à une large plage de valeurs de succion [Zornberg et McCartney, 2007]. Le modèle de van Genuchten se traduit par l'équation suivante :

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha\psi)^n)^m} \quad \text{Équation 4}$$

Où,

- $\theta(\psi)$: teneur en eau en fonction de la succion
- θ_r : teneur en eau résiduelle
- θ_s : teneur en eau saturée
- α : paramètre d'ajustement relié à la valeur d'entrée d'air
- n : paramètre d'ajustement relié à la pente de désaturation
- m : paramètre d'ajustement relié à la fin de courbe ($m = 1 - 1/n$)

2.2.5 Fonction de conductivité hydraulique

La fonction de conductivité hydraulique (k-fonction) est un principal outil pour étudier les écoulements dans les sols non saturés. Cette courbe est une fonction de la conductivité hydraulique d'un matériau selon la succion exprimée sur une échelle logarithmique. Le point de départ de cette courbe est la valeur de conductivité hydraulique à saturation maximale pour le matériau analysé, ce qui correspond à la valeur de K_{sat} . À noter que les matériaux grossiers ont une valeur de conductivité hydraulique saturée élevée, tandis que pour les matériaux à grains fins, elle est plus faible [Zornberg et McCartney, 2007]. De plus, il est important de mentionner que le point de cassure de la k-fonction correspond à la valeur d'entrée d'air de la CRE. De plus, comme dans le cas de la CRE, la porosité et les conditions de compaction influencent le comportement de la fonction de conductivité hydraulique [Zornberg et McCartney, 2007].

Pour mieux comprendre ces détails, la figure 6 présente des fonctions de conductivité hydraulique pour différents sols. Le sable a la valeur de conductivité saturée la plus faible avec une valeur de $1,00E-04$ m/s tandis qu'elles sont de l'ordre de $1,00E-06$ et $1,00E-07$ m/s pour le silt et l'argile. Également, ce graphique met en évidence une réalité non intuitive, soit celle qu'un sol grossier peut devenir moins perméable qu'un sol fin. Effectivement, pour une succion supérieure à 21,9 kPa, la conductivité hydraulique du sable devient inférieure à celle de l'argile. Comme la pente de la courbe d'un sol argileux est plus douce que pour un sol sableux.

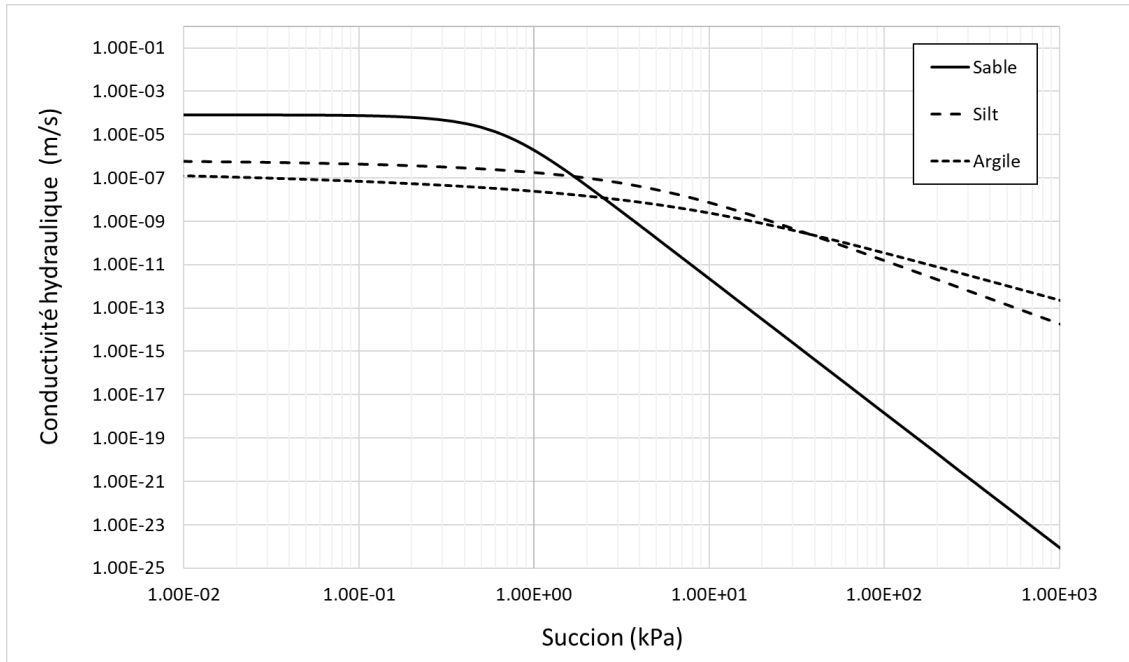


Figure 6 : Fonction de conductivité hydraulique pour différents sols faite selon le répertoire USDA d'Hydrus

Comme il est difficile de déterminer de manière directe la fonction conductivité hydrauliques en laboratoire [Wendroth et *al.*, 1993], alors une estimation indirecte est réalisée basée sur la CRE [Fredlund et *al.*, 2002, Huang et *al.*, 1998, Mualem, 1976].

Le modèle de la k-fonction le plus souvent utilisé est obtenu en insérant l'équation de Mualem [1976] dans le modèle de van Genuchten [1980], car il s'agit d'un modèle simple et facile à utiliser.

$$k(\psi) = k_{sat} \frac{[1 - (\alpha\psi)^{nm}(1 + (\alpha\psi)^n)^{-m}]^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{ml}} \quad \text{Équation 5}$$

Où,

- $k(\psi)$: conductivité hydraulique en fonction de la succion
- k_{sat} : conductivité hydraulique saturée
- $\alpha, n, \text{ et } m$: paramètres de van Genuchten
- l : constante générale égal à 0,5

2.2.6 Barrière capillaire

La compréhension de barrière capillaire commence par l'interprétation de la courbe de rétention d'eau (CRE) et de la fonction de conductivité hydraulique (k-fonction), respectivement la figure 5 et la figure 6. Pour la k-fonction présentée dans ce présent document, le point de basculement est lorsque le sable devient moins perméable que l'argile soit à une valeur de succion de 21,9 kPa. En analysant la CRE pour cette valeur, il est possible de constater que le pourcentage de teneur en eau du sable est d'environ 9%, ce qui correspond presque à la phase de saturation résiduelle du sol tandis que pour l'argile, il est de 35%, ce qui renvoie à la phase de saturation. Alors, cette valeur de succion (21,9 kPa) permet de désaturer considérable le sable, mais de manière négligeable l'argile. Par conséquent, si le sable est maintenu en état désaturé, il est possible de l'utiliser comme barrière à l'écoulement, ce qui correspond au concept de barrière capillaire. La barrière capillaire se produit lorsqu'un sol fin (couche de rétention capillaire (CRC)) est placé sur un sol grossier (couche de bris capillaire (CBC)) ainsi le contraste de texture contrôle l'infiltration verticale à travers la barrière grâce aux forces capillaires [Parent et Cabral, 2006]. Conséquemment, les infiltrations dans la CRC ont tendance à s'accumuler dans cette dernière empêchant ainsi les infiltrations d'eau dans la CBC. L'eau s'accumule alors dans la CRC jusqu'à atteindre un débit maximal, nommée capacité de transfert. Puis, lorsque cette capacité est atteinte, chaque goutte supplémentaire est transmise dans la CBC selon une longueur de transfert déterminée par le modèle proposé par Ross [1990] et lorsque la couche est inclinée selon l'un de ces modèles : Khire et *al.* [2000] ou Parent et Cabral [2006]. L'application de barrière capillaire dans la conception des sites d'enfouissement est une possibilité intéressante, car elle permet de réduire les infiltrations. Effectivement, une configuration du recouvrement conçue selon le principe de barrière capillaire permet d'augmenter la quantité d'eau déviée de l'infiltration grâce à l'évaporation, car elle permet d'accumuler un maximum d'eau pendant les périodes humides et de la relâcher par la suite dans l'atmosphère.

2.3 MÉTHODES D'ESTIMATION DU TAUX DE PERCOLATION

Il existe plusieurs méthodes pour estimer le taux de percolation comme mentionné dans l'article de Benson et *al.* [2001]. Cependant, dans le cadre de ce projet, seulement deux de ces méthodes sont abordées, car il s'agit de celles qui s'appliquent le mieux au contexte de recherche.

2.3.1 Calculs du taux de percolation à partir des sondes de teneur en eau et de succion

Le taux de percolation peut être calculé à partir des données de teneur en eau si les propriétés hydrauliques non saturées sont connues, c'est-à-dire la courbe de rétention d'eau ainsi que la fonction de conductivité hydraulique. Comme précisé dans l'article de Benson et *al.* [2001], cette approche est l'application de la loi de Darcy.

$$P_r = K_\psi i \quad \text{Équation 6}$$

Où,

$$\begin{array}{ll} P_r & : \text{taux de percolation} \\ K_\psi & : \text{conductivité hydraulique à une succion} \\ i & : \text{gradient hydraulique} \rightarrow i = \Delta h / \Delta Z \end{array}$$

Effectivement, la valeur de la conductivité hydraulique est obtenue en associant la valeur de succion dans la fonction de conductivité hydraulique. Par la suite, le gradient hydraulique est calculé à partir des valeurs de succion entre deux points qui sont transformés en charge de pression, puis comme l'élévation des sondes est connue, il est possible de déterminer leur charge d'élévation et ainsi leur charge totale [Holtz, 1991].

Cette méthode comporte plusieurs importantes limitations telles que les chemins préférentiels au travers des défauts macroscopiques [Khire et *al.*, 1997], les potentielles diversions latérales causées par les petites variations de texture des sols et l'anisotropie dans les propriétés hydrauliques [McCord et Stephens, 1987].

2.3.2 Lysimètre

La seconde méthode présentée pour estimer le taux de percolation est celle des lysimètres. Benson et *al.* [2001] précisent qu'il s'agit de la méthode la plus précise. En effet, les lysimètres utilisés pour le projet *Alternative Cover Assessment Program* (ACAP) permettaient d'estimer le taux de percolation avec une précision entre 0,00004 et 0,5 mm/année. Puis, contrairement aux autres méthodes, il permet d'obtenir une mesure directe du taux de percolation [Mijares, 2012].

Depuis plus de 100 ans, les lysimètres sont utilisés dans le domaine de l'agriculture et de la science des sols [Kohnke et Dreirelbis, 1940]. Cependant, leur utilisation dans le domaine de la géotechnique environnementale est relativement récente, soit moins de 20 ans. Par définition, les lysimètres sont des contenants enfouis dans le sol dont le dessous est ouvert pour permettre la collecte et la mesure de l'eau dans un sol non saturé [Benson et *al.*, 2001].

Il existe plusieurs types de lysimètres, soit les lysimètres à section de céramique poreuse [Grossmann et Udluft, 1991], les lysimètres à mèche (*wick lysimeter*) [Zhu et *al.*, 2002] et les lysimètres à tension nulle (*zero tension lysimeter* ou connu également sous le nom de *pan lysimeter*) [Bew et *al.*, 1997]. Pour l'application dans un recouvrement final d'un site d'enfouissement, le lysimètre à tension nulle est le plus commun [Mijares, 2012], car il est non dispendieux et relativement facile à construire. Également, ces lysimètres ont une aire beaucoup plus grande que les autres ce qui permet de mieux saisir les hétérogénéités à l'échelle du site, c'est-à-dire les macropores, les fissures du sol, les différences de compaction, etc. [Benson et *al.*, 1994 ; Khire et *al.* 1997].

La figure 7 présente un schéma d'un lysimètre à tension nulle typique utilisé pour évaluer la performance des recouvrements alternatifs réalisés dans le projet ACAP. Il est à noter que la limite inférieure du lysimètre est une limite de flux nul avec un drainage latéral se produisant à travers une couche de drainage en géocomposite ou en gravier comme recommandé par Khire [1997] et Albright et *al.* [2006]. Également, l'eau recueillie au fond s'écoule à l'extérieur du récipient par gravité grâce à un tuyau qui est à pression atmosphérique.

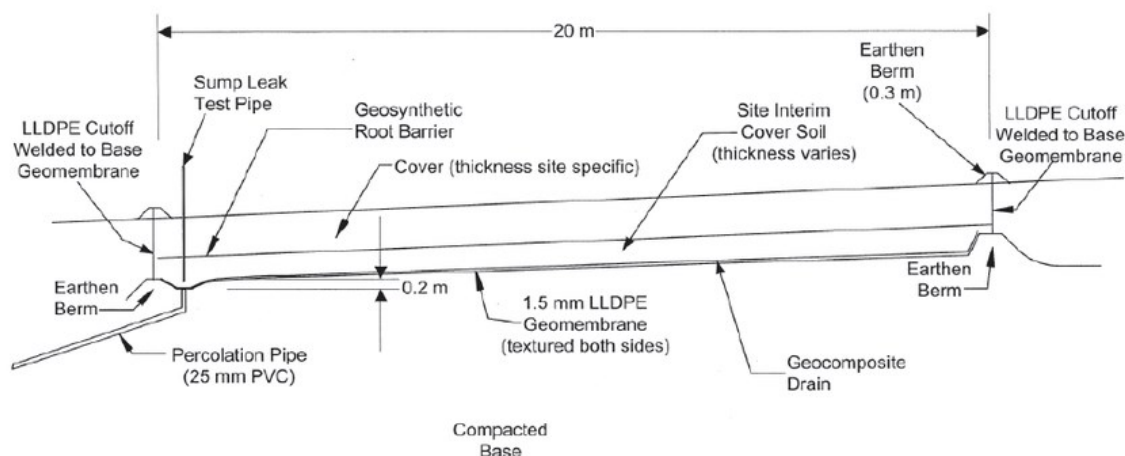


Figure 7 : Schéma d'un lysimètre à tension nulle typique utilisé pour évaluer la performance des recouvrements alternatifs dans le projet ACAP
[Source : Benson et al., 2001]

L'article de Bew et Barbour [1999] précise que de nombreux lysimètres ne fournissent pas des mesures exactes, car ils sont construits selon de mauvaises conceptions. Par conséquent, il est important de considérer les principes fondamentaux des sols non saturés pour leur conception. À l'heure actuelle, la littérature présente plusieurs méthodes pour la conception des lysimètres. Cependant, dans le cadre de projet de maîtrise, seulement deux méthodes sont retenues : celle présentée par Benson et *al.* [2001] et celle élaborée par Parent et *al.* [2006].

L'article de Benson et *al.* [2001] énonce les précisions au niveau des éléments à considérer pour la conception des lysimètres. Par exemple, l'effet de diversion latérale peut influencer le taux de percolation, car il se produit lorsqu'il existe une différence de potentiel hydraulique de part et d'autre des parois, ce qui fait en sorte que l'eau évite le lysimètre ou s'infiltre trop dans ce dernier. Un autre élément important est que si les lysimètres sont trop petits ou trop étroits, ils sous-estiment la quantité d'eau percolée. D'où l'importance d'installer de grands lysimètres qui permettent de mieux représenter les conditions générales du terrain.

Benson et *al.* [2001] propose un lysimètre qui monte jusqu'à la surface. Autrement dit, il est installé dans la totalité de la couche imperméable du recouvrement du site d'enfouissement. Il s'agit du type de lysimètre utilisé dans le projet *Alternative Cover Assessment Program* (ACAP). Cette méthode évite les problématiques hydrauliques, car

les parois montent jusqu'à la surface. Bref, les propriétés des sols non saturés ne sont pas considérées pour cette conception.

L'article Parent *et al.* [2006] présente une conception qui exige une attention particulière à la hauteur du lysimètre afin de respecter le comportement hydraulique dans un milieu non saturé. Un détail important pour vérifier le bon fonctionnement des lysimètres est que les valeurs de succion à la bouche du lysimètre, c'est-à-dire à l'intérieur et à l'extérieur, respectivement identifiées comme B_{int} et B_{ext} dans la figure 9, soient égales [Bews et Barbour, 1999]. S'il y a différence entre ces deux valeurs, l'eau diverge du lysimètre ou s'infiltre trop dans celui-ci, comme présenté à la figure 8, ce qui fausse la valeur du taux de percolation mesurée.

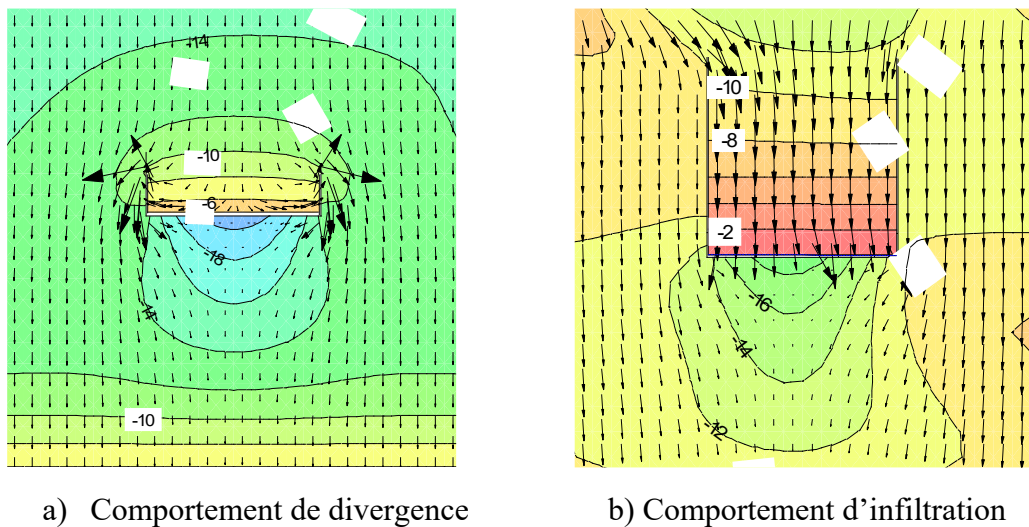


Figure 8 : Comportement hydraulique à la bouche de lysimètres
[Source : Parent *et al.*, 2006]

Selon l'article de Parent *et al.* [2006], pour un débit d'infiltration de conception (q), si le profil de succion est vertical à la hauteur de la bouche du lysimètre, autrement dit le gradient hydraulique est égal à 1, alors $k=q$ (voir figure 9), il n'y a pas de différence entre la pression totale à l'intérieur et l'extérieur du lysimètre ($Hb = 0$). En d'autres termes, l'écoulement de part et d'autre des parois est le même. Pour obtenir cette condition de ($Hb = 0$), les parois du lysimètre doivent être au moins égales à la colonne d'eau correspondant à la valeur de succion obtenue à l'intersection entre le débit d'infiltration de conception (q) et la fonction de conductivité hydraulique.

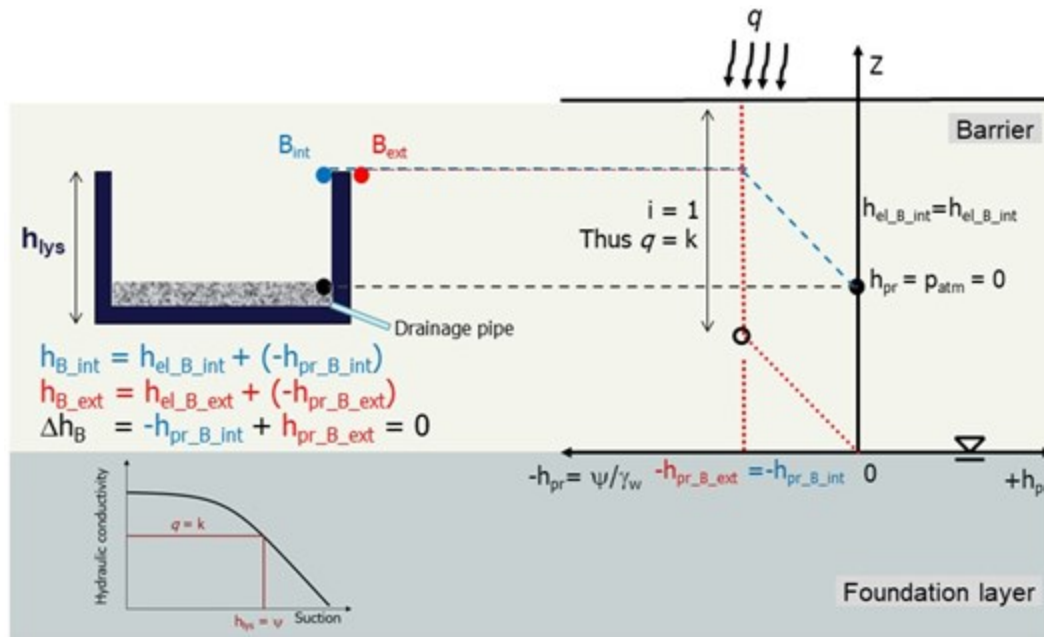


Figure 9 : Principes de conception de lysimètre à tension nulle
[Source : Cabral et *al.* 2019]

À noter que le débit d'infiltration de conception (q) influence la hauteur des parois du lysimètre. Effectivement, selon la fonction de conductivité hydraulique d'un sable, pour un débit élevé, par exemple de $1,00 \text{ E } -9 \text{ m/s}$ (voir figure 10), la hauteur des parois est petite soit de $0,38 \text{ m}$ (voir figure 11) tandis que pour un débit faible par exemple de $1,00 \text{ E } -19 \text{ m/s}$ (voir figure 10), la hauteur des parois est grande soit de $15,29 \text{ m}$ (voir figure 11). En bref, les faibles débits sont difficiles à récupérer vu la hauteur importante des parois qu'ils nécessitent.

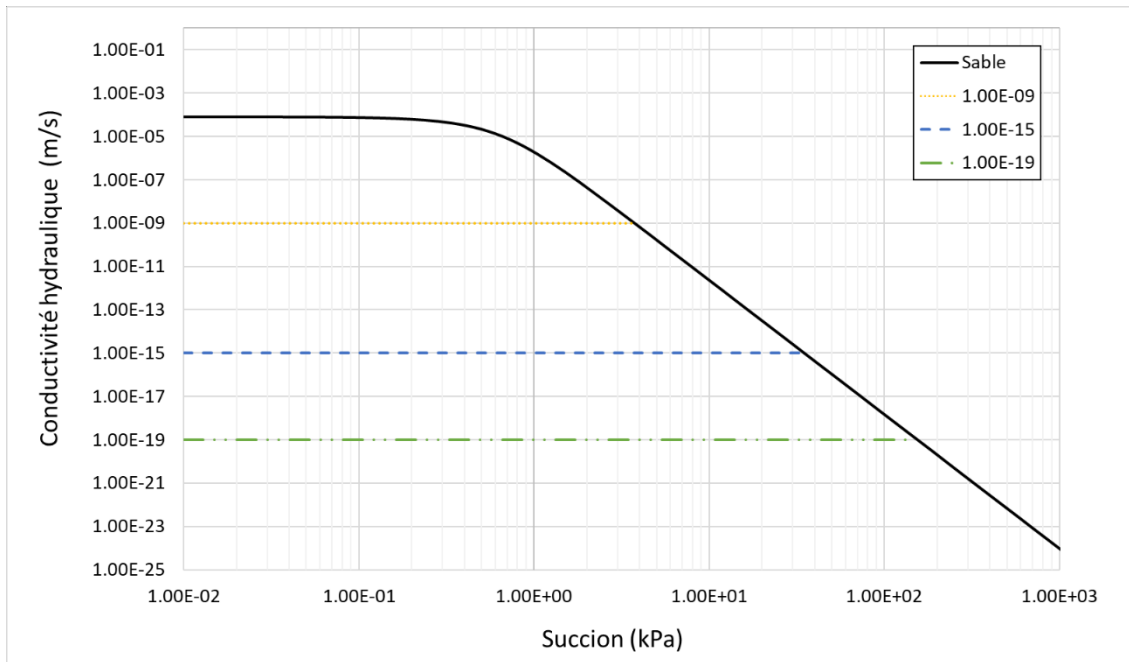


Figure 10 : Fonction de conductivité hydraulique pour différents débits

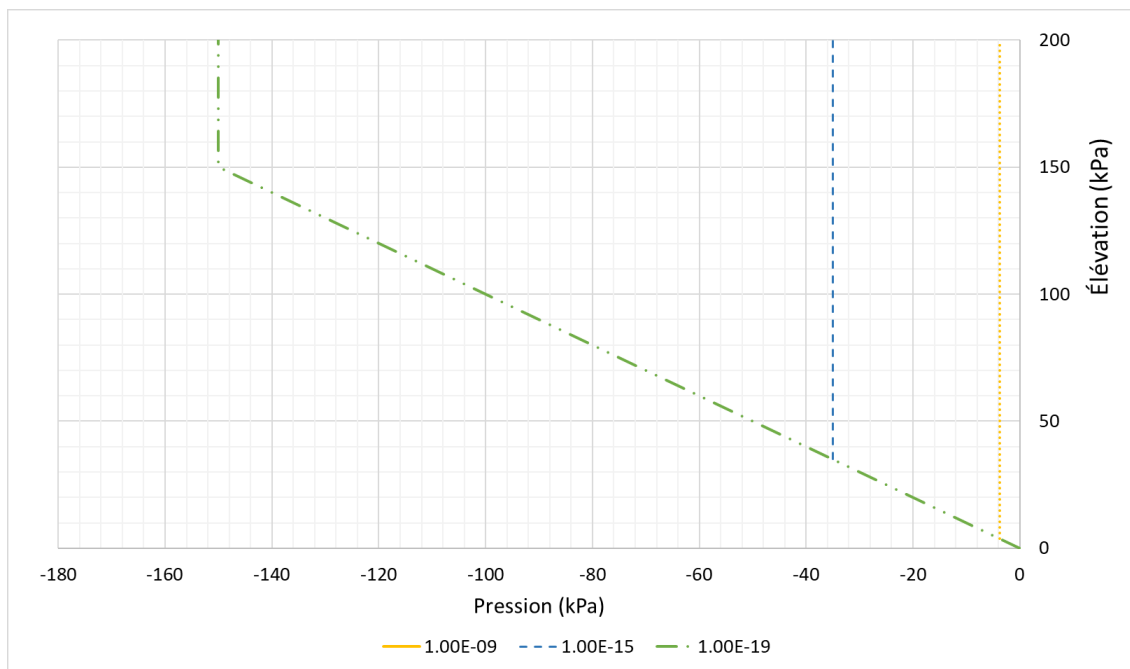


Figure 11 : Profil de succion selon différents débits

Cette méthode développée par Parent *et al.* [2006] possède deux limitations majeures. La première est causée par la variabilité des données climatiques qui influence le taux de percolation. La deuxième dépend des propriétés des sols non saturés.

D'autres aspects à considérer pour la conception sont que le lysimètre doit être rempli avec le même matériau dans la zone identifiée « *barrier* » dans la figure 9 et que les conditions de mise en place (compaction, teneur en eau) doivent être les mêmes afin de s'assurer que la fonction de conductivité hydraulique, soit la même à l'intérieur et à l'extérieur du lysimètre [Bews et Barbour, 1999].

Également, il est possible que différentes configurations de sols soient élaborées, plaçant ainsi un sol fin sur un sol grossier. Cette situation entraîne alors la création de barrière capillaire comme présentée à la section 2.2.6. L'eau s'accumule alors à la base et ne peut pas s'écouler hors du lysimètre en raison de la présence d'une barrière capillaire comme expliquée dans l'article de Benson *et al.* [2001]. Cette problématique est liée à une différence importante dans la taille des pores des sols qui se traduit par un contraste de conductivité hydraulique qui nuit au bon écoulement.

En ce qui concerne la présence d'instruments, l'article de Bew et Barbour [1999] précise que des tensiomètres et des sondes de teneurs en eau doivent être installés à l'intérieur et à l'extérieur, car le lysimètre peut prendre des années avant de collecter une quantité mesurable d'eau. Un faible taux de percolation peut expliquer cette situation. Les tensiomètres mesurent la pression dans les pores interstitiels et fournissent des informations relatives au gradient hydraulique. Les sondes de teneurs en eau font le suivi des masses d'eau traversant le sol. Autrement dit, la présence de ces instruments permet de fournir des informations complémentaires au comportement du lysimètre.

2.4 SITUATION ACTUELLE DES SOLS CONTAMINÉS AU QUÉBEC

Afin de valider l'hypothèse concernant les effets sur l'environnement par la présence de sols contaminés, la présentation de la situation actuelle des sols contaminés au Québec est de mise. Cette explication s'articule autour des critères génériques, de l'enfouissement des sols contaminés et de la réglementation dans les sites d'enfouissement.

2.4.1 Critères génériques

Le guide d'intervention relatif à la protection des sols et la réhabilitation des terrains contaminés explique que les « critères génériques pour les sols permettent d'évaluer l'ampleur d'une contamination et de fixer les objectifs de décontamination pour un usage donné » [MDDEL, 2016]. La grille des critères génériques a été adoptée au Québec en 1985. Aujourd'hui, les critères sont définis selon trois lettres, c'est-à-dire A, B et C. Le critère A correspond aux teneurs naturelles des paramètres inorganiques et limites de quantification pour les paramètres organiques selon les différentes provinces géologiques québécoises. Les critères B et C sont établis respectivement selon les valeurs limites réglementaires de l'annexe I et II du RPRT. Le critère B est la limite acceptable pour des terrains résidentiels ou des terrains où se déroulent certains usages institutionnels et le premier mètre des aires de jeu des parcs municipaux. Le critère C est la limite maximale acceptable pour des terrains industriels, commerciaux, institutionnels non sensibles et récréatifs [MDDEL, 2016].

2.4.2 Enfouissement des sols contaminés

Le règlement sur l'enfouissement des sols contaminés [RESC] du Québec fournit les paramètres permettant l'enfouissement des sols contaminés [Gouvernement du Québec, 2018c]. Le premier critère est qu'au moins 90 % des contaminants initiaux soient enlevés à la suite d'un traitement autorisé en vertu de la loi sur la qualité de l'environnement. Le deuxième critère est qu'un rapport détaillé démontre qu'un contaminant ne peut pas être enlevé à au moins 90 % à la suite d'un traitement optimal et qu'aucune technique de traitement supplémentaire n'est disponible au Québec [MDDEL, 2016].

Les dernières données sur les quantités enfouies publiées sont celles de 2014 dans la politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés et plan d'action 2017-2020 [MDDELCC, 2017]. Ce document stipule que la quantité de sols traités et enfouis est de 1 562 009 tonnes métriques en 2014 au Québec. De cette quantité, 69 % des sols ont été traités ce qui correspond à 1 074 102 tonnes métriques tandis que 31 % ont été enfouis, soit de 487 907. La grande majorité des sols enfouis sont des sols dont la contamination est supérieure à C.

De toute évidence, le recours à l'enfouissement est fréquent au Québec, car, comme mentionné dans la politique de protection des sols, il existe des lacunes technologiques au niveau du traitement de certains types de contaminant. Il y a un manque d'options de valorisation pour ces types de sol, mais surtout que le coût de l'enfouissement est plus faible que celui du traitement à l'aide de techniques de réhabilitation telles que la biodégradations, la biopile, l'oxydation chimique, le lavage des sols, la désorption thermique, etc.



Au Québec, la politique de protection des sols mentionne que les sols contaminés excavés devraient être valorisés. Effectivement, il est plus avantageux d'utiliser ces types de sol que des matériaux propres dans divers travaux d'ingénierie. Cette valorisation permet de faciliter la gestion des sols traités et de ne pas sacrifier de l'espace pour les éliminer ainsi que de diminuer la pression sur les milieux naturels qui devraient être exploités pour répondre aux besoins de matériau d'infrastructure.

2.4.3 Réglementation dans les sites d'enfouissement

Le règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles [REIMR] fournit les détails pour la réglementation des sols contaminés dans le recouvrement de site d'enfouissement technique [Gouvernement du Québec, 2018a]. Effectivement, il précise que les sols ayant des valeurs limites qui correspondent à l'annexe I du RPRT (type B) peuvent être valorisés comme matériau de recouvrement journalier ou final dans un lieu d'enfouissement technique. Plus spécifiquement, la couche de drainage peut contenir des contaminants en concentration égale ou inférieure aux limites fixées à l'annexe I du RPRT pour les composés organiques et à l'annexe II pour les autres paramètres. En ce qui

concerne les sols ayant des valeurs limites qui correspondent à l'annexe II du RPRT (type C), il est possible de les valoriser uniquement comme matériau de recouvrement journalier. En bref, le sol de catégorie B peut être utilisé comme recouvrement final, mais pas le sol contaminé de catégorie C. Le tableau 1 présente un résumé des éléments expliqués précédemment.

Tableau 1 : Résumé des critères génériques et de l'autorisation de l'utilisation comme recouvrement final

A	B	C
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Teneur de fond pour les paramètres inorganiques et limite de quantification pour les paramètres organiques ▪ En fonction des régions géologiques 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Annexe I du RPRT ▪ Recouvrement final 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Annexe II de RPRT ▪ Recouvrement final 

3 EFFECTUER LA CONCEPTION ET LA PLANIFICATION DU PLAN EXPÉRIMENTAL

Ce chapitre présente les éléments fondamentaux de conception de ce projet de recherche, c'est à partir de ces contraintes et de ces idées que le projet a été planifié et construit. D'abord, il est question de localiser le plan expérimental pour comprendre les enjeux du terrain. Par la suite, les détails liés à la conception sont traités dans l'objectif de cerner les différentes configurations, de déterminer les hauteurs des parois et de valider le concept de manière numérique. Pour réaliser toutes ces étapes dans les meilleurs délais et éviter les erreurs de construction, une planification rigoureuse a été réalisée.

3.1 LOCALISATION DU PLAN EXPÉRIMENTAL

Ce projet de recherche se déroule au site d'enfouissement de Waste Management Inc. de St-Nicéphore, Drummondville. Les activités ont commencé en 1984 et plusieurs phases d'opération se sont enchaînées. Toutefois, dans le cadre de ce mémoire, seulement la phase 1 construite de 1984 à 1966 est abordée puisque le partenaire industriel désire caractériser cette région. La figure 12 présente la vue aérienne la région de la phase 1 et l'emplacement du plan expérimental.

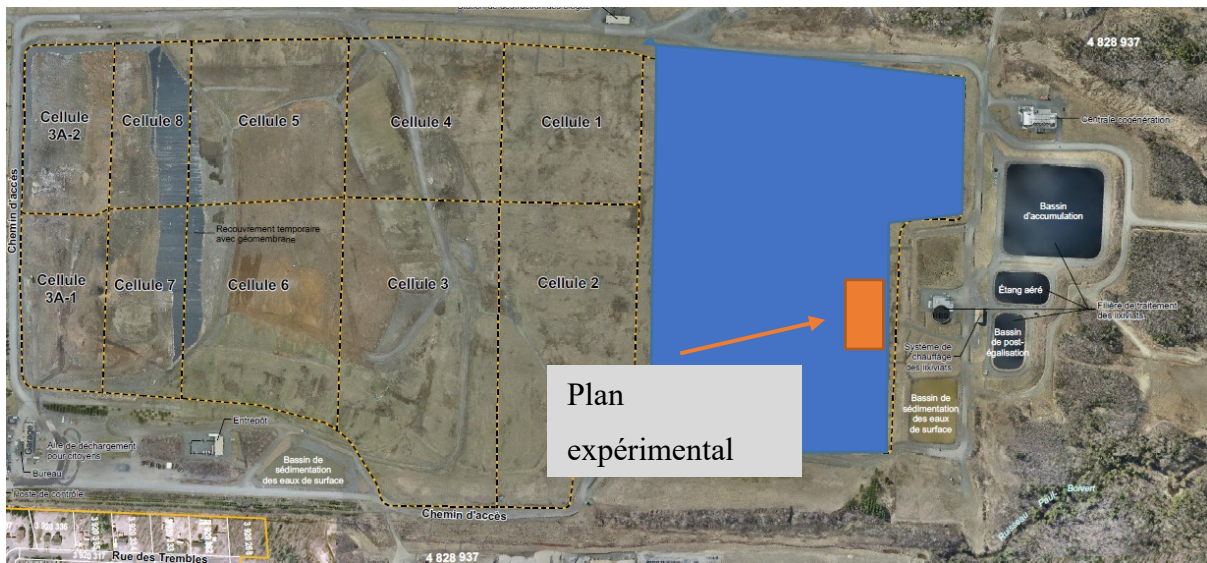


Figure 12 : Vue aérienne du site d'enfouissement de St-Nicéphore
[Source : Waste Management Inc.]

Au sein de cette région, le plan expérimental des lysimètres est construit à proximité du plan de traitement des eaux, car cette région offrait des pentes suffisantes pour installer les tuyaux de sortie des lysimètres ainsi parce qu'il n'y avait pas d'accumulation d'eau naturelle. Une caractérisation du relief du terrain a été effectuée grâce à une évaluation sommaire de la topographie du terrain. La section 4.2 du rapport de construction transmis à Waste Management Inc. en février 2019 fournit les détails supplémentaires de cette activité. En bref, l'état de l'emplacement choisi en 2017 pour la construction éventuelle des lysimètres est présenté à la figure 13.



Figure 13 : Emplacement choisi en 2017 pour la construction du plan expérimental

Également, un autre aspect qui a influencé le choix de l'emplacement est la composition du recouvrement à cet endroit. Des *tests pit* ont été faits à proximité de l'emplacement choisi pour identifier la stratigraphie. La figure 14 illustre un croquis de la stratigraphie typique. Les épaisseurs totales du recouvrement pour les différents essais variaient entre 2,44 et 2,59 m. Alors, il y a suffisamment de sol pour la construction des lysimètres sans s'approcher des déchets. Plus de détails sur les *tests pit* sont présents dans le rapport de construction présent à l'annexe C.

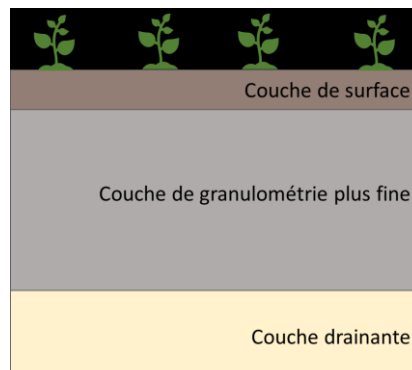


Figure 14 : Stratigraphie typique du recouvrement au-dessus des déchets

3.2 CONCEPTION

La conception est une étape cruciale, car elle est à l'origine des décisions pour la suite des travaux. Cette tâche permet d'identifier adéquatement les besoins dans le but de répondre aux objectifs de recherche autant ceux du partenaire industriel que ceux scientifiques.

3.2.1 Explications des différentes configurations

Dans le cadre de projet de recherche, cinq lysimètres ont été construits, chacun avec des particularités différentes, soit au niveau de la méthode utilisée pour déterminer la hauteur des parois des lysimètres, soit des sols mis en place. Cependant, pour ce mémoire, seulement quatre lysimètres sont traités. Les résultats pour le cinquième lysimètre seront présentés dans les prochaines publications faites par le groupe.

- Le lysimètre 1 (ou L1) est rempli avec un matériau de recouvrement (nommé *cover material* pour les publications anglaises) qui est caractérisée comme un sable silteux. La hauteur des parois est conçue selon la méthode adoptée pour le projet ACAP (*Alternative Cover Assessment Program*) Benson et al. [2001]), c'est-à-dire les parois rejoignent la surface. Comme il n'y a pas une épaisseur de sol au-dessous des murs, le problème de diversion latérale n'est pas présent. Également, dans le cadre de ce projet, il est identifié comme l'élément de contrôle.
- Le lysimètre 2 (ou L2) est rempli avec le même matériau que L1. À noter que ces deux lysimètres sont construits dans le même enclos afin de permettre une meilleure comparaison. La hauteur des parois est conçue selon la méthode proposée par Parent et al. [2006]. L'objectif est d'améliorer la méthodologie de conception des lysimètres de grandes dimensions.
- Le lysimètre 3 (ou L3) contient du matériau de recouvrement ainsi que du sol contaminé de catégorie BC. Il s'agit du premier essai au Québec de son utilisation comme matériau de construction dans les sites d'enfouissement. S'il est prouvé que cette classe de sol contaminé n'affecte pas la qualité des eaux de ruissellement et des sols, une utilisation bénéfique des sols contaminés de catégorie BC pourrait générer un gain économique important. En outre, cela aurait un impact positif sur le plan environnemental, car des sols moins naturels seraient nécessaires pour

construire le recouvrement final des sites d'enfouissement. En d'autres termes, ce lysimètre permet de valider l'hypothèse formulée liée à l'utilisation des sols contaminés dans le recouvrement.

- Le lysimètre 4 (ou L4) est rempli de matériau de recouvrement et de sol contaminé de catégorie AB. À noter que le site reçoit une quantité significative de sol contaminé de catégorie AB, donc l'objectif de ce lysimètre est de voir si la disposition d'une couche d'AB sur le recouvrement actuel influencerait les infiltrations selon le principe de barrière capillaire.

Les coupes de profil des différents lysimètres sont présentées aux figure 15 à Figure 18. Dans le cadre de L3 et L4, une couche de matériau de recouvrement a été placée à la base des lysimètres afin de simuler l'éventuel profillement du recouvrement de la région de la phase 1. Pour L3, une couche de 150 mm est placée au-dessus de la couche de sol contaminé de catégorie BC pour réduire le potentiel de migration des contaminants vers la surface. Pour chaque lysimètre, une couche de 10 cm de sable et de 10 cm de gravier sont placées au fond afin de favoriser le drainage du système. Aussi, une couche de support à la végétation de 150 mm est placée telle qu'exigée par le REIMR. Plus de détails sont disponibles à la section 2.1 et 2.3.5 du rapport de construction présent à l'annexe C.

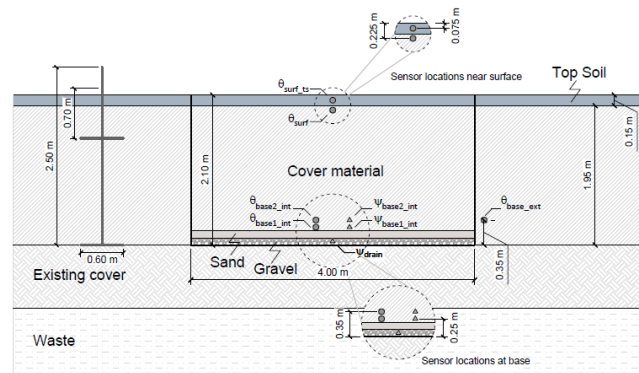


Figure 15 : Coupe de profil avec les instrumentations - L1

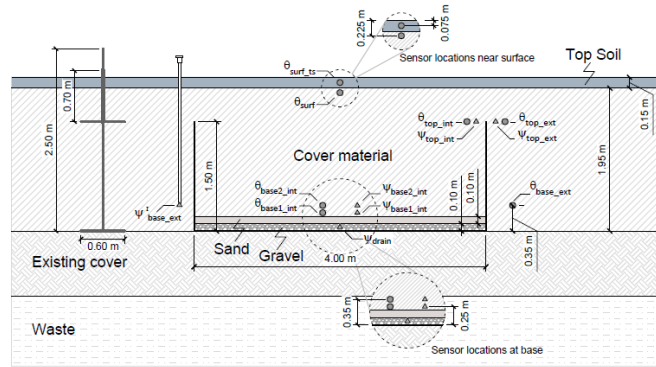


Figure 16 : Coupe de profil avec les instrumentations - L2

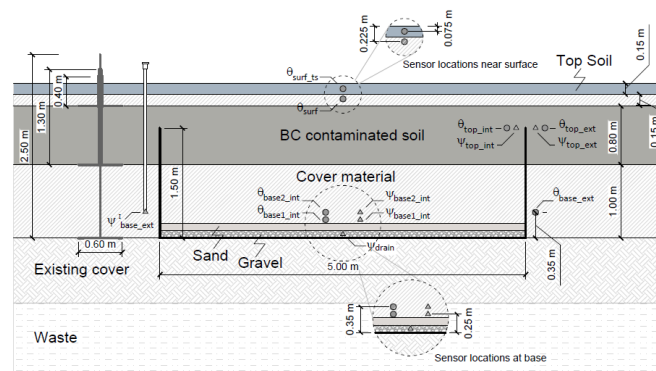


Figure 17 : Coupe de profil avec les instrumentations - L3

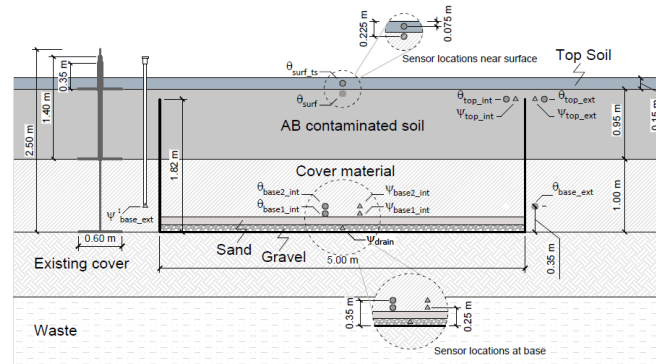


Figure 18 : Coupe de profil avec les instrumentations - L4

3.2.2 Détermination de la hauteur des parois

Les lysimètres 2, 3 et 4 ont été conçus selon la méthode proposée par Parent *et al.* [2006]. Le premier aspect à considérer est le taux de percolation qui est calculé à partir d'une simplification de la différence entre les quantités des taux de précipitation et

d'évapotranspiration (calculée selon la méthode Penman [1948]). Pour la période représentative utilisée, la valeur du taux de percolation est approximativement de $1,0 \text{ E-}8 \text{ m/s}$. Par la suite, le taux de percolation déterminé est intégré dans les fonctions de conductivité hydraulique obtenues en laboratoire pour obtenir la succion associée telle que présentée à la figure 19. Sachant qu'il est possible de transformer la succion (kPa) en équivalent de hauteur de colonne d'eau ($\text{kPa}/9,81 \text{ m/s}$), la hauteur des parois recommandée est obtenue. À cette hauteur, il faut ajouter 20 cm, car il faut considérer l'épaisseur des couches de gravier et de sable. Pour les sols étudiés, les hauteurs potentielles des parois sont présentées dans le tableau 2. Pour le L2 et le L3, comme il était possible et réalisable sur le terrain, les parois ont été construites jusqu'à 1,5 m, ce qui permet de récupérer des taux de percolation plus faibles. Toutefois, pour L4, il était impossible d'atteindre la hauteur recommandée de 2,61 m considérant les aspects la stratigraphie du site et les difficultés liées à la réalisation. Plus de détails concernant la détermination de la hauteur des parois sont disponibles à la section 1.1 du rapport de construction présent à l'annexe C.

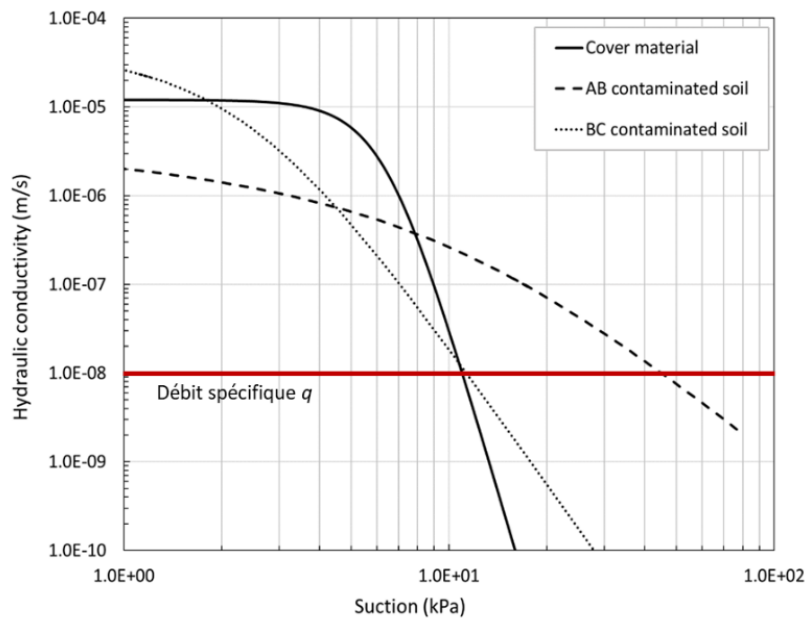


Figure 19 : Fonction de conductivité hydraulique des différents sols avec le taux de percolation déterminé

Tableau 2 : Valeurs des hauteurs potentielles des parois des lysimètres.

Sol	Hauteur totale (m)
Recouvrement	1,30
Sol contaminé de catégorie AB	2,61
Sol contaminé de catégorie BC	1,30

3.2.3 Vérification par modélisation

La modélisation numérique est une tâche primordiale dans la conception du projet, car elle permet de vérifier si les hauteurs déterminées à l'aide de la méthode proposée par Parent et al. [2006] fonctionnent. Pour se faire, il faut étudier le phénomène de diversion latérale.

3.2.3.1 Équation de Richards

L'écoulement vertical en une dimension dans les sols non saturés peut être décrit par l'équation de Richards [1931]. Cette équation est basée sur la loi de Darcy [1856] qui a été développée pour les écoulements saturés dans les milieux poreux et qui exprime la proportionnalité entre le flux d'eau (q) et le gradient de charge hydraulique (i). Richards a ajouté une exigence de continuité en stipulant que la constante de proportionnalité (k), appelée conductivité hydraulique, est fonction de la teneur en eau du sol à cette dernière. Autrement dit, la combinaison de l'équation de continuité qui exprime la conservation de la masse d'eau dans un volume élémentaire représentatif du sol [Ngnepieba et al, 2002] et l'équation de Darcy qui est l'équation de la quantité de mouvement permet d'obtenir l'équation de Richards, soit une différentielle partielle.

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left[K(\theta) \left(\frac{\delta h}{\delta z} \right) + 1 \right] \quad \text{Équation 7}$$

Où,

- K : conductivité hydraulique
- h : pression relative par rapport à la pression atmosphérique exprimée en hauteur d'eau
- z : élévation au – dessus d'un point de référence vertical
- θ : teneur en eau volumétrique
- t : temps

Les logiciels fréquemment utilisés dans le domaine de l'ingénierie qui permettent la résolution de cette équation sont SEEP/W et Hydrus.

3.2.3.2 Hydrus

Ce rapport présente les résultats obtenus avec la version Hydrus 2D/3D version 2.x. Cette version permet par exemple de simuler le flux d'eau, le transport de chaleur et de solutés, le transport des bactéries et des colloïdes dans des milieux humides pour des scénarios en deux et trois dimensions. [Simunek et *al.* 2011]. Il utilise des éléments finis linéaires pour résoudre numériquement l'équation de Richards en régime transitoire pour un flux d'eau saturé/non saturé.

Les fonctions du logiciel sont nombreuses, cependant les applications pertinentes liées à ce projet s'articulent principalement autour des fonctions suivantes :

- Les propriétés hydrauliques du sol non saturé peuvent être décrites à l'aide de fonctions analytiques de type van Genuchten, Brooks et Corey, modifiées de van Genuchten, Kosugi et Durner.
- L'absorption d'eau par les racines peut être simulée en fonction du stress hydrique et de la salinité.

3.2.3.3 Paramètres nécessaires à la modélisation

Pour effectuer la modélisation, il est nécessaire d'imposer les paramètres des matériaux ainsi que les conditions climatiques à étudier. Alors, les propriétés hydrauliques des sols sont présentées au chapitre 4.2.2.2 et introduites selon la méthode analytique de van Genuchten. Les données des taux de précipitation et d'évapotranspiration sont fournies pour la période 2010 à 2017. Une longue période est nécessaire pour mettre la stabilisation du modèle, mais l'analyse du débit est faite seulement de 2013-2015.

3.2.3.4 Croquis pour la modélisation

Quoique les lysimètres sont en 3D, l'analyse est faite en deux dimensions à des fins simplificatrices. Le lysimètre 2 est modélisé sans variation des paramètres hydrauliques dans les différentes couches de sol, car, à l'heure actuelle, les manipulations faites dans Hydrus ne permettent pas la convergence du modèle. Autrement dit, les propriétés du

matériau de recouvrement est utilisé pour tous les différents sols placés dans le lysimètre. Éventuellement, il sera possible de varier les paramètres pour la couche en support à la végétation et le terrain naturel. Également, il est à noter que les couches de sable et de gravier ne sont pas nécessaires dans le modèle, car ces matériaux transmettent une succion égale à zéro. Aux pourtours du modèle, une condition atmosphérique de *no flux* et de *free drainage* sont imposées. En ce qui concerne le lysimètre, il est dessiné avec un vide entre les parois ce qui permet d'imposer les différentes conditions de drainage soit de *no flux* pour les parois et de *seepage face* au fond tel que suggéré dans le guide d'utilisation d'Hydrus [2011]. La figure 20 présente une capture d'écran du modèle fait sur Hydrus ainsi que les conditions de contour.

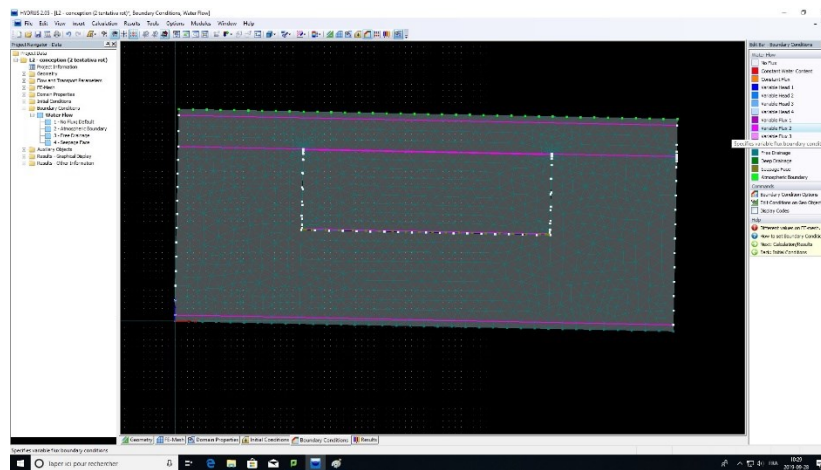


Figure 20 : Capture d'écran du modèle avec les conditions de contour

3.2.3.5 Résultats

Le modèle actuel ne permet pas le calcul de la simulation numérique. Effectivement, il affiche un message d'erreur concernant un problème avec les conditions initiales de la teneur en eau tel que présenté à la figure 21. Puis, si ce problème est ignoré pour continuer le calcul, un deuxième message d'erreur apparaît cette fois-ci liée aux conditions de contour de l'écoulement de l'eau (voir figure 22). Si ce problème est négligé, le premier message d'erreur réapparaît. Autrement dit, les deux problèmes interagissent en boucle. Pour remédier à ces problèmes, plusieurs solutions ont été explorées telles que recommencer le modèle, changer la condition du point d'intersection. Cependant, aucune n'a fonctionné.

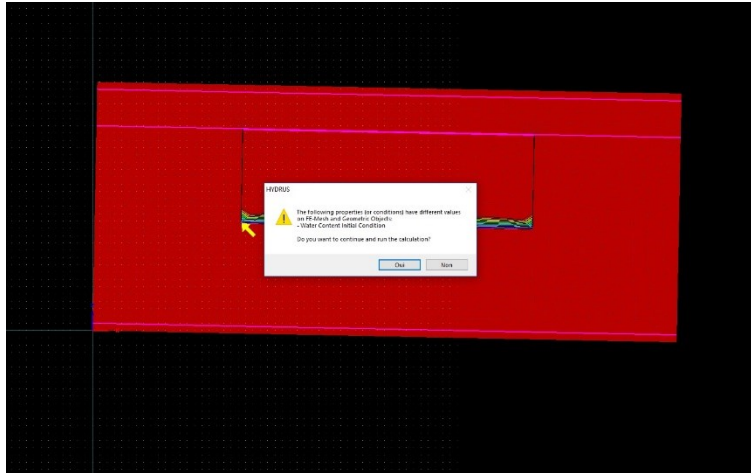


Figure 21 : Capture d'écran avec le message d'erreur des conditions initiales de teneur en eau

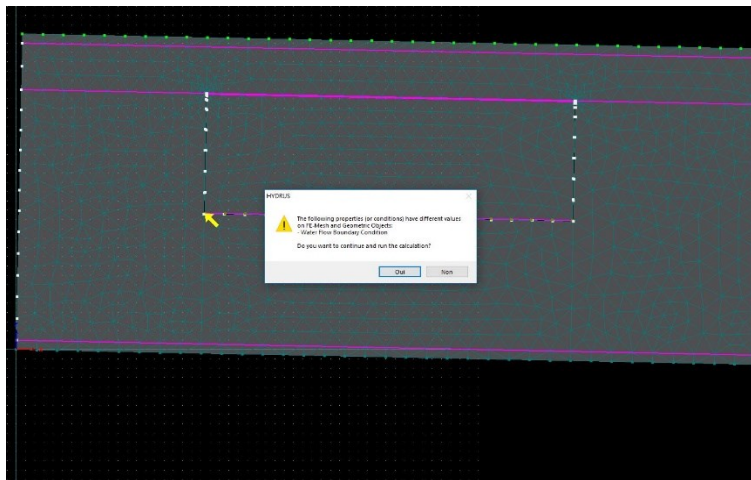


Figure 22 : Capture d'écran avec le message d'erreur des conditions de bordure d'écoulement de l'eau

Pour le futur, il faut trouver une solution qui va permettre d'exécuter le calcul sans erreur. Pour se faire, il faut explorer les paramètres du système, par exemple de vérifier la précision des paramètres des *mesh-lines*, la configuration des paramètres de condition limite liée à l'écoulement et/ou de teneur en eau initiale. À savoir qu'Hydrus est un logiciel complexe qui offre un large éventail de possibilités. Le groupe de recherche continue à travailler sur ces modélisations. Puis, lorsque des résultats concluants seront obtenus, il faudra vérifier que le flux normalisé du *mesh-line* à l'intérieur et à l'extérieur du lysimètre soit égal pour s'assurer que la conception du lysimètre est adéquat.

3.3 GÉNÉRALITÉS DE LA CONSTRUCTION

Il est vrai que la hauteur des parois des lysimètres, les types et les épaisseurs des sols sont des éléments différents pour chaque lysimètre. À savoir que l'aire des lysimètres est différente, L1 et L2 ont une aire de 16 m² tandis que L3 et L4 possèdent une aire de 25 m². Cette différence est explicable par le fait que L1 et L2 sont construits dans le même enclos et que l'espace était réduit à cet endroit vu la présence de drain de biogaz à proximité. De plus, le partage de l'enclos est favorable pour la comparaison des deux méthodes, car il permet l'hétérogénéité des sols au niveau des propriétés du sol, des macrofissures et de la végétation.

Quelques détails sont constants dans les différents enclos. La figure 23 présente une coupe de profil typique d'un enclos de lysimètre. Le fond de l'excavation et les couches de sol mis en place respectent une pente de 2 % pour certifier le bon écoulement de l'eau tel que recommandé dans le REIMR. Pour chaque enclos, il y a différents instruments installés pour évaluer le comportement tels qu'une plaque de tassement, des barils pour la récupération de l'eau des taux de ruissellement et de percolation, de différentes sondes, etc. Plus de détails sur les instruments sont fournis au chapitre 5.

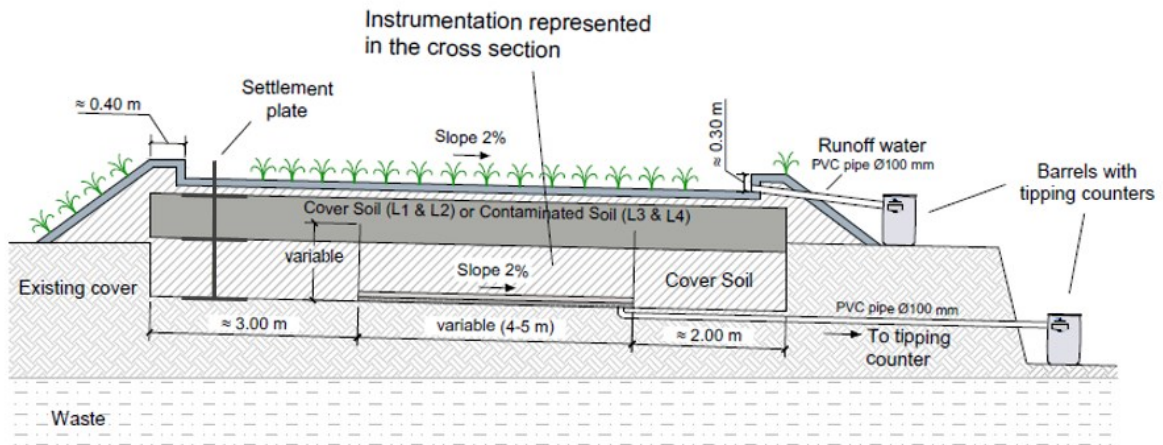


Figure 23 : Coupe de profil typique d'un enclos de lysimètre

3.4 PLANIFICATION

Pour mener à terme la construction sans ennui majeur, une planification rigoureuse a été nécessaire. Le travail préparatoire a consisté à effectuer une caractérisation physique primaire des sols typiques et à vérifier la loi des filtres de ces matériaux pour s'assurer d'un bon drainage au sein du système (section 2.2 du rapport de construction présent à l'annexe C). De plus, des plans techniques ont été produits à l'aide du logiciel AutoCAD afin d'illustrer le concept, de connaître les dimensions exactes des lysimètres, de déterminer les volumes des sols, etc. Par la suite, les commandes des matériaux (sable, gravier, géotextile) ont été faites. La construction du bassin de géomembrane HDPE a été confiée à une équipe de Waste Management Inc. de Sainte-Sophie. Également, pour déterminer l'ordre des étapes de construction et bien coordonner l'ensemble des activités, une planification a été réalisée à l'aide du logiciel de gestion de projet MsProject.

4 DÉTERMINER LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET HYDRAULIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS

Les essais de caractérisation effectués en laboratoire déterminent les propriétés physiques et hydrauliques des sols. Les tests réalisés sont des analyses granulométriques par tamisage et par sédimentation et de la détermination de densités des particules solides, etc. En ce qui concerne les propriétés hydrauliques, elles s'articulent autour de la courbe de rétention d'eau et de la fonction de conductivité hydraulique qui sont nécessaires pour la conception des lysimètres et l'analyse du fonctionnement de ce dernier.

La nomenclature utilisée pour décrire les sols abondamment présents sur le site de St-Nicéphore est la suivante :

- Matériau de recouvrement (*cover material*)
- Sol contaminé de catégorie AB (*contaminated AB soil*)
- Sol contaminé de catégorie BC (*contaminated BC soil*)

À noter qu'une caractérisation complète a été faite pour tous les sols utilisés durant la construction. Toutefois, à des fins simplificatrices, les différents types de matériau de recouvrement sont présentés par un sol médian qui est le plus représentatif.

4.1 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Cette section présente la méthodologie et les résultats des essais de laboratoire pour la détermination des propriétés physiques.

4.1.1 Explications des normes et de la théorie

Les détails des normes émises par le bureau de normalisation du Québec et la théorie liée à la nomenclature sont présentés ci-dessous.

4.1.1.1 Densité des particules solides

La méthode de la densité des particules solides (D_s) est expliquée dans la norme CAN/BNQ 2501-070. Elle permet de déterminer la densité des particules solides d'un sol passant le tamis de 5 mm. Par définition, la densité des particules solides est le rapport entre la masse des particules solides à une température donnée et la masse d'un volume d'eau pure égale au volume des particules solides à la même température [BNQ, 2014b].

4.1.1.2 Analyses granulométriques par tamisage et par sédimentation

L'analyse granulométrique des sols inorganiques est réalisée à l'aide de la norme du bureau de normalisation du Québec. Le référence de cette norme est CAN/BNQ 2501-025 [BNQ, 2014a]. Elle permet d'établir une méthode d'essai qui permet de déterminer la distribution granulométrique des particules d'un diamètre inférieur à 80 mm dans les sols inorganiques (voir figure 24). Concrètement, elle permet de réaliser un fractionnement sur des tamis ayant différentes ouvertures. Le diamètre minimum est de 0,08 mm pour la méthode avec tamis ainsi pour des diamètres inférieurs à 0,08 mm (voir figure 25), une méthode différente par sédimentation des particules d'une suspension est utilisée pour obtenir la suite de distribution granulométrique. Cette seconde méthode nécessite l'utilisation d'un hydromètre.



Figure 24 : Granulométrie par tamisage
[Source : YouTube, 2017]

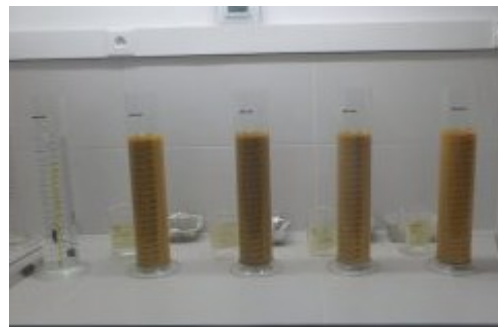


Figure 25 : Granulométrie par sédimentation
[Source : GIA, 2016]

4.1.1.3 Nomenclature des sols

La nomenclature des sols est importante, car elle permet leur identification et leur classification. À partir de la courbe granulométrique, il est possible de déterminer les proportions respectives de chaque type de sol (gravier, sable, silt et argile) exprimées en pourcentage. À partir de ces valeurs, une appellation est attribuée au sol. Dans le cadre de

ce projet de recherche, la désignation des sols selon la proportion des types de sol et celle de l'USDA sont utilisées. Il est important de noter que la méthode de l'USDA est utilisée uniquement pour la modélisation numérique et l'estimation du coefficient de perméabilité saturé avec le Mini Disk.

Dans un premier temps, l'appellation des sols selon la proportion des types de sols est une méthode qui est fonction de la proportion des types de sol présent et, puis, une terminologie y est associée.

Dans un second ordre d'idée, l'appellation développée par l'*United States Department of Agriculture* (USDA) est une classification triangulaire, dont les côtés portent des échelles représentant les proportions de sable, de silt et d'argile mesurées sur un échantillon de sol. Ces triangles sont divisés en zones portant une appellation conventionnelle selon les proportions relatives des types de sol telles que présentés à la figure 26. À noter que cette méthode n'est applicable que pour un sol contenant moins de 30 % d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm.

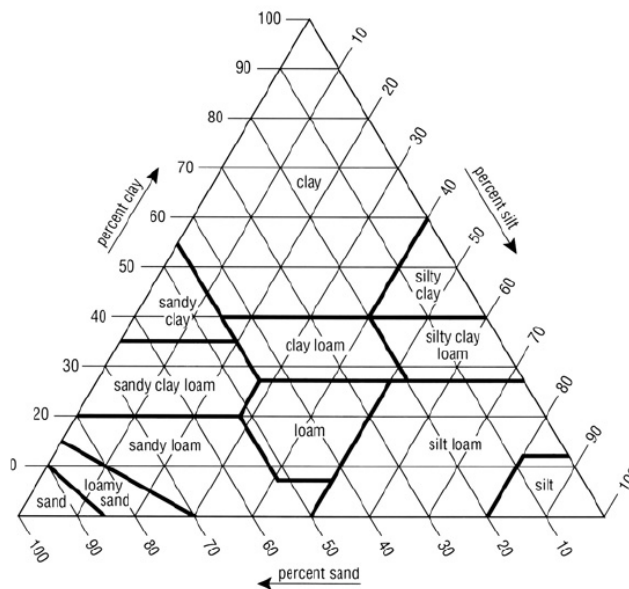


Figure 26 : Triangle des textures des sols selon USDA
[Source : USDA, 2019]

4.1.2 Résultats

Le tableau 3 présente les résultats d'essais de densité des particules solides et les nomenclatures des sols. Les courbes granulométriques des matériaux utilisés sont présentées à la figure 27.

Tableau 3 : Densité des particules solides et nomenclature des sols utilisés pour la construction du plan expérimental

Nom du sol	Densité des particules solides	Nomenclature	
		Proportion des types sols	USDA
Recouvrement	2,70	Sable silteux	Sandy loam
Sol contaminé de catégorie AB	2,74	Silt sableux	Sandy silt
Sol contaminé de catégorie BC	2,77	Gravier sableux	NA

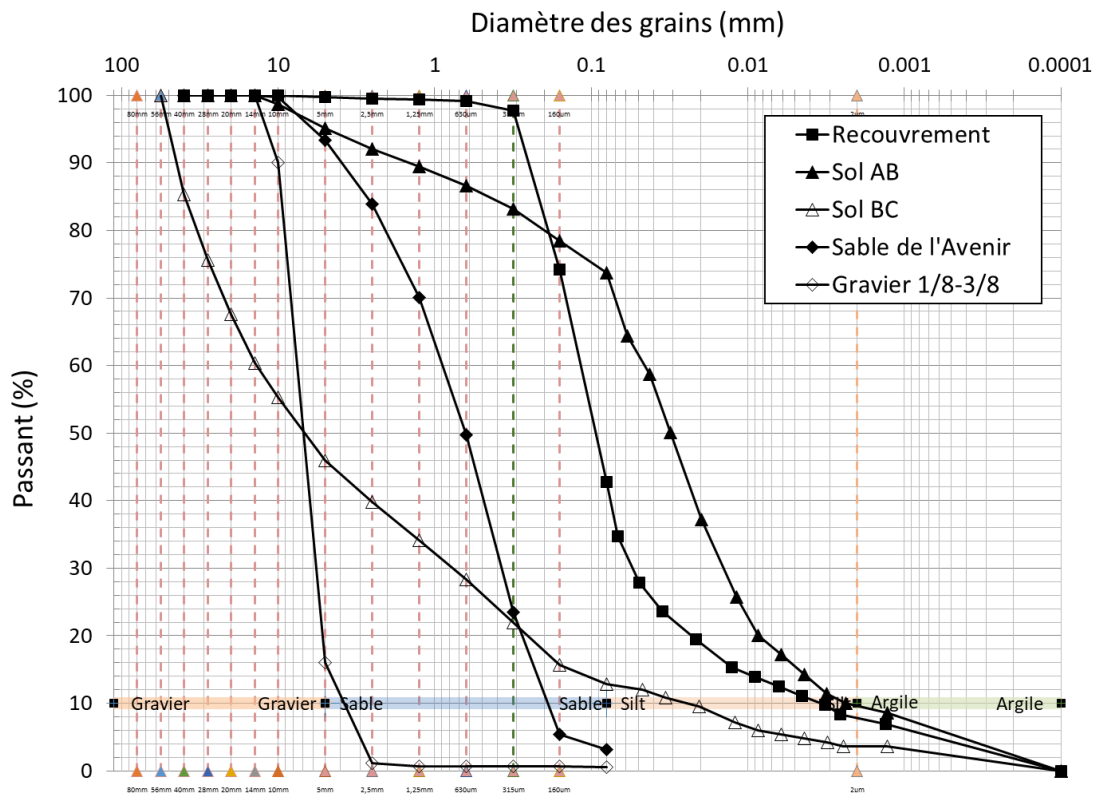


Figure 27 : Courbe granulométrique des sols utilisés pour la construction du plan expérimental

4.2 PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES

Cette section présente les instruments ayant permis de déterminer les propriétés hydrauliques des sols utilisés pour la construction du plan expérimental. Il est important de rappeler que ces paramètres sont essentiels à la détermination de la hauteur des parois des lysimètres selon la méthode développée par Parent et *al.* [2006].

4.2.1 Coefficient de perméabilité saturée (K_{sat})

Comme expliqué dans le chapitre de l'état de l'art, le coefficient de perméabilité saturée (K_{sat}) est un paramètre fondamental pour l'obtention de la fonction de conductivité hydraulique. Pour ce projet, deux instruments différents sont utilisés dans l'objectif d'obtenir une redondance dans les résultats.

4.2.1.1 Fonctionnement des instruments

Les deux méthodes utilisées pour déterminer le coefficient de perméabilité saturée sont un infiltromètre (Mini Disk) (voir figure 28) et un perméamètre nommé KSAT (voir figure 29). Premièrement, l'infiltromètre de type Mini Disk est fabriqué par Meter. Il permet de mesurer la conductivité hydraulique saturée d'un sol [Decagon, 2005]. Il s'agit d'un instrument simple à utiliser autant en laboratoire que sur le terrain. Dans le cas de ce projet, il est utilisé en laboratoire après la constitution d'un échantillon. Cependant, il aurait été intéressant d'obtenir des valeurs *in situ*, il s'agit alors d'une recommandation pour les prochains projets de ce type. Le Mini Disk fonctionne selon les *Principles of Soil and Plant Water Relations* émis par Kirkham [2014] qui stipule que « les mètres par jour de l'eau s'infiltrant dans le sol sous l'effet de la gravité ou sous un gradient hydraulique unitaire. » En bref, l'eau pénètre dans le sol non saturé à partir du moment où la succion dans le sol est supérieure à celle imposée à la base du Mini Disk. Deuxièmement, le perméamètre KSAT est fabriqué par Meter et il permet de mesurer la conductivité hydraulique des sols saturés en laboratoire. Il fonctionne selon l'application de l'équation de Darcy [Meter, 2017]. Effectivement, la perméabilité à l'eau (K_s) est calculée à partir du flux d'eau volumétrique (V) divisé par la zone d'échantillon de sol (A) et le temps (t), la longueur de l'échantillon de sol (L) et le gradient de la charge hydraulique (H) dans le sens de l'écoulement.

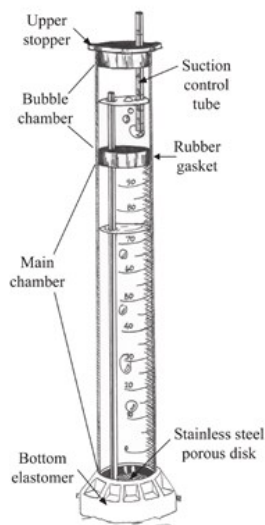


Figure 28 : Infiltrmètre de type Mini Disk
[Source : Decagon, 2005]



Figure 29 : Perméamètre KSAT Meter
[Source : Meter, 2017]

4.2.1.2 Résultats

Le tableau 4 présente les valeurs du coefficient de perméabilité saturée obtenues à l'aide de l'infiltrmètre (Mini-Disk) et du perméamètre KSAT. Il est important de noter que les coefficients présentent la moyenne faite à partir de 3 essais minimalement. Aussi, comme le sol contaminé de catégorie BC possède une granulométrie grossière, il était alors impossible de réaliser les essais dans l'anneau de 8 cm. Par conséquent, le sol tamisé *in situ* a été placé dans un moule Proctor afin que les essais du Mini-Disk soient réalisés, ce qui permet une meilleure représentativité de l'échantillon. Sinon, le sol BC a été tamisé à 5 mm pour déterminer un coefficient de perméabilité approximatif.

Tableau 4 : Valeurs du coefficient de perméabilité saturée

Sol		Coefficient de perméabilité saturée	
		Mini Disk	Ksat
		(m/s)	(m/s)
Recouvrement	Sable silteux	2,18 E -05	2,34 E -05
Sol contaminé de catégorie AB	Silt sableux	2,60 E -06	4,75 E -06
Sol contaminé de catégorie BC	Gravier sableux	Tamisé à 56 mm	9,55 E -06
		Tamisé à 5 mm	-
Sable de l'Avenir	Sable	1,74 E -05	4,93 E -05
		4,35 E -04	1,82 E -04

4.2.1.3 Comparaison des valeurs

Les deux instruments pour l'ensemble des sols analysés donnent des résultats dans le même ordre de grandeur, ce qui montre que les deux méthodes se vérifient. La figure 30 présente les ordres de grandeur de la conductivité hydrauliques théorique de divers sols. Les valeurs sont cohérentes avec la théorie à l'exception du sol contaminé de catégorie BC qui est un gravier sableux et qui possède un coefficient de perméabilité saturée entre 10^{-5} et 10^{-6} m/s. En effet, ce sol devrait avoir un coefficient de perméabilité saturée plus faible, toutefois cette différence s'explique par le fait que c'est la matrice fine du matériau qui a été étudiée. La valeur devrait plutôt se situer entre 10^{-3} et 10^{-5} m/s [Musy et Soutter, 1991]. Sinon, pour les autres sols, les valeurs du coefficient de perméabilité saturée se situent dans les intervalles recommandés. En bref, les sols sont semi-perméables.

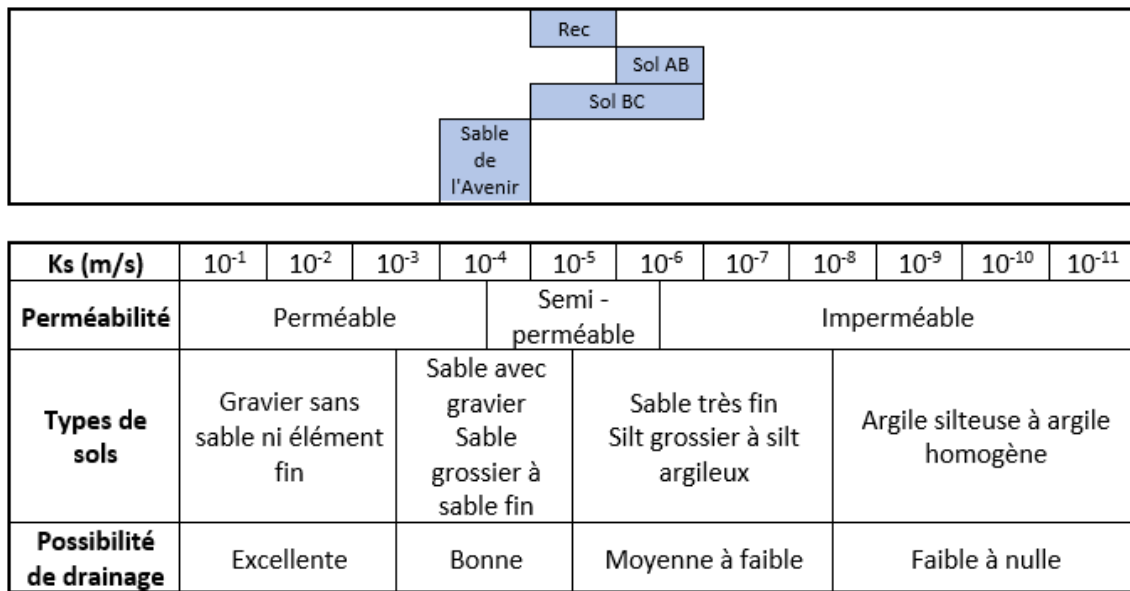


Figure 30 : Ordre de grandeur de la conductivité hydraulique de divers sols et valeurs des sols étudiés
[Source : Musy et Soutter 1991 adaptée par Virginie Simard]

4.2.1.4 Ouverture

Au moment de la rédaction de ce mémoire, des essais réalisés à l'aide d'un perméamètre à paroi flexible basée sur la norme ASTM D5084 sont en cours. Les avantages de cet essai sont qu'il permet de placer le sol à une densité souhaitée dans une éprouvette, puis de le saturer afin qu'il atteigne une saturation visant le 100 % en vérifiant avec le *B-check* tel

n'est pas le cas pour les autres essais. Éventuellement, il serait intéressant de comparer les résultats obtenus avec ceux des essais du Mini-Disk et du KSAT de Meter.

4.2.2 Courbe de rétention d'eau (CRE) et fonction de conductivité hydraulique (k-fct)

La détermination de la courbe de rétention d'eau et de la fonction de conductivité hydraulique est importante pour la caractérisation des paramètres hydrauliques des sols non-saturés.

4.2.2.1 Fonctionnement de l'instrument

Les courbes de rétention d'eau (CRE) sont obtenues à l'aide d'un appareil nommé Hyprop (voir figure 31) dont l'abréviation découle d'*HYdraulic PROPerTy analyser*. Il est fabriqué par Meter. Ce système automatisé permet de déterminer la courbe de conductivité hydraulique de séchage et la courbe de rétention d'eau d'une colonne de sol verticale en se basant sur la méthode d'évaporation de Wind [1966].



Figure 31 : Système Hyprop de Meter
[Source : Meter, 2015]

À des intervalles de temps différents, les tensions sont mesurées par deux petits tensiomètres positionnés à des profondeurs différentes et une balance enregistre les variations de poids. L'ensemble du système est connecté à un logiciel d'acquisition de données, HYPROP VIEW, qui permet d'enregistrer les données et de les analyser avec HYPROP FIT dans l'objectif d'obtenir la courbe de rétention d'eau [Meter, 2015]. Les valeurs obtenues sont par la suite exportées dans un fichier Excel afin de les traiter. Les valeurs exprimées en pF (logarithme décimal d'une colonne d'eau en centimètres) sont

converties en kPa. La CRE est lissée avec le modèle de Van Guetchen – Mualem [1976] à l'aide d'un solveur réalisé dans Excel pour obtenir la fonction de conductivité hydraulique.

4.2.2.2 Présentation des courbes et des paramètres de van Genuchten

Les figure 32 et figure 33 présentent respectivement la courbe de rétention d'eau et la fonction de conductivité hydraulique des trois principaux sols utilisés pour la construction du plan expérimental. La courbe de CRE pour le sol contaminé de catégorie BC est obtenue pour le matériau tamisé à 5 mm. Conséquemment, cet essai est un indicatif de la situation *in situ*, car le comportement de l'ensemble de la matrice du sol est sans doute différent. Pour les travaux futurs, il sera pertinent d'améliorer cette estimation en corrigeant la CRE du sol BC obtenue par Hyprop (tamisé à 5 mm) selon le pourcentage de gravier contenu dans le sol selon la méthode proposée par Khaleel et Relyea [1997].

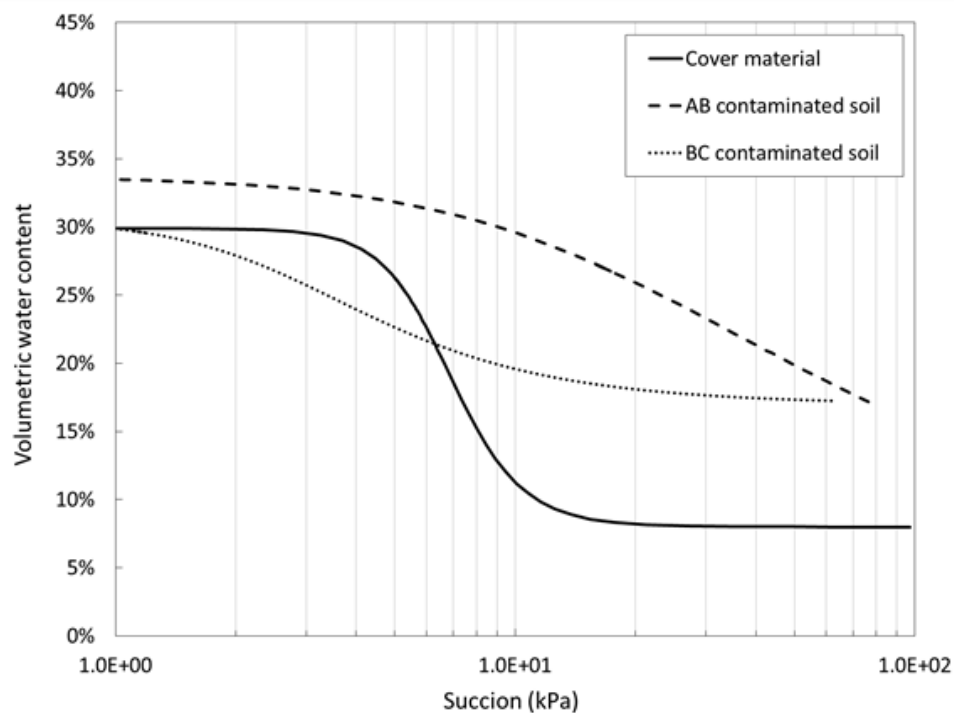


Figure 32 : Courbe de rétention d'eau des sols utilisés dans ce projet

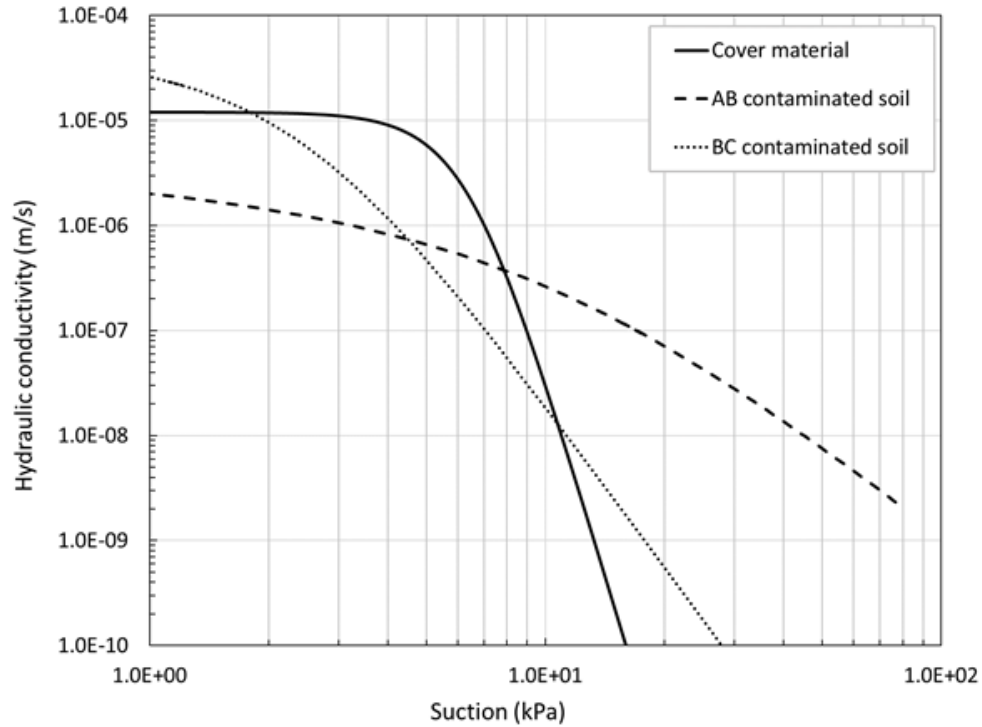


Figure 33 : Fonction de conductivité hydraulique des sols utilisés dans ce projet

Les paramètres de van Genuchten [1980] sont nécessaires pour connaître les propriétés hydrauliques des sols introduits dans le modèle numérique pour la validation du concept. Ils sont présentés au tableau 5.

Tableau 5 : Valeurs des paramètres hydrauliques obtenus en laboratoire

Sol	Classification USDA	α (1/cm)	n -	θ_s (%)	θ_r (%)	Ksat (cm/j)
Recouvrement	Sandy loam	0,016	5,23	30,0	8,0	202,18
Sol contaminé de catégorie AB	Silt loam	0,007	1,39	34,0	0,0	41,04
Sol contaminé de catégorie BC (tamisé à 5 mm)	Loamy sand	0,037	2,26	31,0	0,17	425,95

5 VÉRIFIER LA CONFORMITÉ ET CALIBRER LES INSTRUMENTS

Afin d'assurer le suivi des lysimètres, de nombreux instruments et sondes ont été installés dans le plan expérimental de St-Nicéphore. Plus précisément, ils permettent d'évaluer de manière continue les quantités d'eau percolant dans les différentes configurations de recouvrement, de mesurer la quantité et la qualité de l'eau de ruissellement de chaque enclos, etc. Les différentes composantes du bilan hydrique sont analysées selon divers instruments :

Élément du bilan hydrique		Type d'instrument
Taux de précipitation	→	Station météorologique avec pluviomètre
Taux de ruissellement	→	Contenant avec un auget basculeur
Taux d'évapotranspiration	→	Sonde de teneur en eau
Taux d'emmagasinement	→	Sonde de teneur en eau + tensiomètre (suction)
Taux de percolation	→	Contenant avec un auget basculeur

En résumé, des stations météorologiques sont installées afin de recueillir les données *in situ* à proximité des L1 à L4. Les taux des eaux de ruissellement et de percolation sont récupérés et la quantité est déterminée à l'aide d'un contenant avec un auget basculeur. Également, l'eau ruisselée est récupérée à des fins d'analyses chimiques faites par un laboratoire indépendant pour évaluer le niveau de contamination. Les sondes de teneur en eau permettent d'analyser le phénomène d'évapotranspiration. Les sondes de teneur en eau et les tensiomètres permettent d'évaluer le taux d'emmagasinement fait par le sol et de fournir des données pour évaluer la diversion latérale à la bouche du lysimètre. De toute évidence, ils sont des paramètres importants pour valider le fonctionnement du lysimètre. Également, ils permettent de reconstituer la courbe de rétention d'eau et, par conséquent, la fonction de conductivité hydraulique *in situ*, un élément primordial pour les simulations numériques. Puis, comme mentionné dans l'article d'Abdolahzadeh [2011], la fonction de conductivité hydraulique est influencée par le tassement du sol. Pour cette raison, des

plaques de tassement ont été installées dans chaque enclos. Ainsi, selon la diminution des vides dans le sol, la fonction de conductivité hydraulique pourra être ajustée.

Les figure 15 à Figure 18 présentées à la section 3.2.1 fournissent des informations relatives aux différents instruments installés au sein des enclos. En ce qui concerne la nomenclature de l'identification des sondes, elle est présentée dans le tableau 6.

Tableau 6 : Identification des sondes de teneur en eau et des tensiomètres

Symbole	θ – Sonde de teneur en eau 5TM
	ψ – Tensiomètre T4e
Location	Base – À la base du lysimètre. Le nombre 1 renvoie à la sonde installée près du sable, soit à 0,25 à partir du fond du lysimètre tandis que le nombre 2 est situé à 0,1 m au-dessus, soit à 0,35 à partir du fond.
	Top – À la bouche du lysimètre
	Surf – Près de la surface, celle qui est installée dans le <i>topsoil</i> est identifiée (ts) et l'autre est à l'interface entre le <i>topsoil</i> et le sol.
Position	Int – Intérieur du lysimètre
	Ext – Extérieur du lysimètre

À noter qu'avant leur installation sur le terrain, tous les instruments ont été vérifiés afin d'assurer leur conformité. De plus, pour certains d'entre eux, une calibration a été réalisée. Également, considérant la grande quantité de sondes de teneur en eau et de succion installée, l'identification des fils des instruments a été faite selon un code de couleur développé par l'équipe. Le code de couleur fait d'attaches à tête d'équerre (*tie wrap*) fournit des informations sur le type de sonde et leur emplacement précis.

5.1 STATION MÉTÉOROLOGIQUE

Deux stations météorologiques du modèle Vantage Pro 2, fabriquées par la compagnie Davis ont été installées à proximité du plan expérimental. La figure 34 illustre la localisation de ces deux stations météorologiques. En effet, une station est installée dans la région des lysimètres et elle est nommée « station 1 » tandis que l'autre est localisée en bas de la pente, près du bassin de sédimentation des eaux de ruissellement est identifiée « station 5 ». La localisation distincte a pour objectif d'évaluer l'effet des vents ainsi que de fournir une redondance au niveau des données de précipitation.



Figure 34 : Localisation des deux stations météorologiques

Les senseurs de la station météorologique (voir figure 35a) sont équipées de nombreux capteurs qui permettent l'enregistrement de paramètres tels que la température, la vitesse des vents, la radiation solaire, la précipitation, etc. Les données sont transmises instantanément sans fil par une connexion Bluetooth à la console (voir figure 35b) associée qui permet de les visualiser et de les extraire.



a) Senseur



b) Console

Figure 35 : Station météorologique Vantage Pro 2 de DAVIS
[Source : Meter, 2019]

5.2 CONTENANT AVEC UN AUGET BASCULEUR

Afin de quantifier l'eau, des contenants avec un auget basculeur (*tipping counter*) (voir figure 36a) de marque KIPP-100 fabriqué par Meter ont été installés pour mesurer l'eau à différentes localisations. L'acquisition des données se fait à l'aide d'un HOBO fabriqué par Onset Computer Corporation (voir figure 36b). À l'heure actuelle (septembre 2019), il y a 7 KIPP-100 et 2 HOBO d'installés sur le terrain au niveau des 4 lysimètres étudiés.

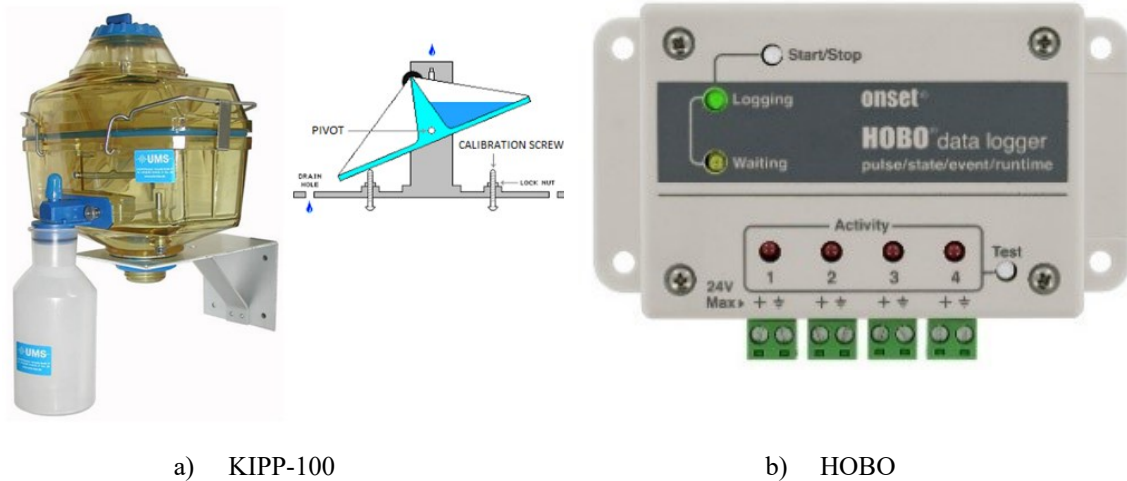


Figure 36 : Contenant avec auget basculeur
[Source : Hoskin, 2019]

Le KIPP-100 mesure la collecte d'eau à chaque 100 mL recueilli dans l'auget, car un mouvement de bascule est enregistré. Pour s'assurer du bon fonctionnement de cet instrument, une quantité de 500 mL d'eau a été versée et 5 mouvements ont été consignés tel que désiré. Il est important de mentionner que le nivellement de cet instrument est très important pour l'obtention de données précises.

Sur le terrain, les contenants avec un auget basculeur mesurent les taux de percolation des lysimètres (4) et de ruissellement (3). À noter que durant la première année, les quantités de l'eau liées au taux de ruissellement ont été mesurées manuellement. Toutefois, ils ont été installés au printemps 2019, ces ajouts permettent d'obtenir des valeurs plus précises.

5.3 TENSIONIOMÈTRES

La succion, un paramètre important pour étudier le comportement des lysimètres et pour constituer la courbe de rétention d'eau *in situ* d'un sol, est mesurée par les tensiomètres. Leur localisation au sein du lysimètre est différente en fonction de leur rôle. Un tensiomètre est installé au-dessous du drain au fond du lysimètre pour vérifier que le drain fonctionne bien pour se faire il doit indiquer une succion égale à zéro. Un couple de tensiomètres est installé légèrement au-dessous du fond du lysimètre pour suivre l'accumulation d'eau. Un autre couple de tensiomètres est placé à la bouche des lysimètres pour documenter le phénomène de diversion latérale. Cette section explique le fonctionnement de ces instruments, la procédure de calibration ainsi qu'une ouverture pour les futurs travaux faits par le groupe de recherche.

5.3.1 Explication du fonctionnement

Le type de tensiomètre utilisé pour ce plan expérimental est le T4e (voir figure 37a) (18 sont installés) et l'acquisiteur de données associé est le DL6 (voir figure 37b) (3 sont installés). Le DL6 permet la connexion de 6 sondes dans un même boîtier. Ces instruments sont fabriqués par Meter. Les tensiomètres mesurent la succion exercée par le sol grâce à une membrane qui se déforme à cause de la désaturation de la pierre poreuse qui se situe à l'extrémité du tensiomètre. Par la suite, la variation de la différence de potentiel est transmise à une jauge et à l'acquisiteur de données. Les lectures limites lues par l'instrument sont de +100 kPa (pression d'eau) et de -85 kPa (succion). De plus, il est important de savoir que tous les instruments installés au sein du plan expérimental ont préalablement été saturés avec la pompe à vide en laboratoire.



a) T4e



b) DL6

Figure 37 : Tensiomètre
[Source : Meter, 2011]

5.3.2 Calibration des DL6

L'acquisiteur de données des tensiomètres fournit les données en millivolt (mV), il faut alors établir une courbe de calibration pour convertir le millivolt en une unité de pression par exemple en hectopascal (hPa). À noter que la calibration s'est effectuée après l'installation des tensiomètres sur le terrain, elle est donc faite pour un tensiomètre type disponible au laboratoire. Les résultats obtenus avec cet instrument sont appliqués à l'ensemble des tensiomètres.

Au laboratoire, la calibration s'est faite selon le principe de colonne d'eau, c'est-à-dire que dix centimètres d'eau correspondent à un kPa. Le tensiomètre est installé à l'intérieur d'un cylindre gradué où il y a de l'eau jusqu'au niveau imposé soit à 7,5 cm, cette hauteur correspond au zéro de mesure. Par la suite, un volume d'eau est ajouté afin d'augmenter la hauteur d'eau de 5 cm et la mesure en millivolt est notée. Cette étape est répétée pour différentes hauteurs d'eau avec des incréments de 5 cm jusqu'à un maximum de 25 cm. Les lectures obtenues sont présentées graphiquement à la figure 38 afin d'obtenir la constante de conversion à l'aide d'une régression linéaire et en imposant l'interception par zéro.

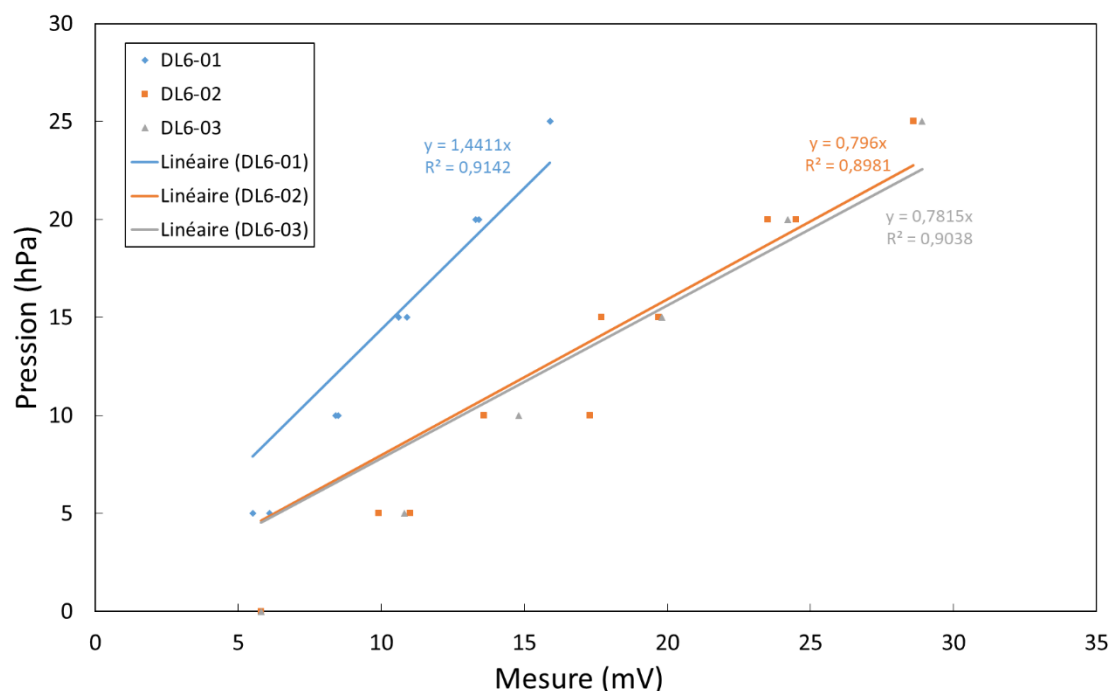


Figure 38 : Courbe de calibration des DL6 en interceptant par zéro

Lors de l'acquisition des données en 2018, il y avait des constantes de conversion présentes par défaut dans les acqui-siteurs de données qui n'avaient pas été modifiées. Au cours de l'année 2019, de nouvelles constantes de conversion ont été mesurées selon la calibration expliquée précédemment. Les valeurs des constantes sont présentées dans le tableau 7. Afin d'ajuster les données collectées en 2018, un rapport est appliqué.

Tableau 7 : Constante de conversion des DL6

Acquisiteur de données	Constante		Rapport
	2018	2019	
DL6- 01	2,134	1,441	0,675
DL6- 02	1,000	0,796	0,796
DL6- 03	1,000	0,782	0,782

Suite à l'analyse de cette première calibration, des erreurs ont été constatées. Dans un premier temps, il ne faut pas imposer l'interception par zéro, car selon le manuel T4 [Meter, 2011], un décalage de 5 hPa est normal considérant la pression d'eau exercée par l'eau dans la pointe de la pierre poreuse de l'instrument. Les nouvelles équations de calibration

sont présentées à la figure 39. À noter que l'équation pour le DL6-01 est différente de celles obtenues pour les DL6-02 et DL6-03, la cause est probablement lors des manipulations en laboratoire.

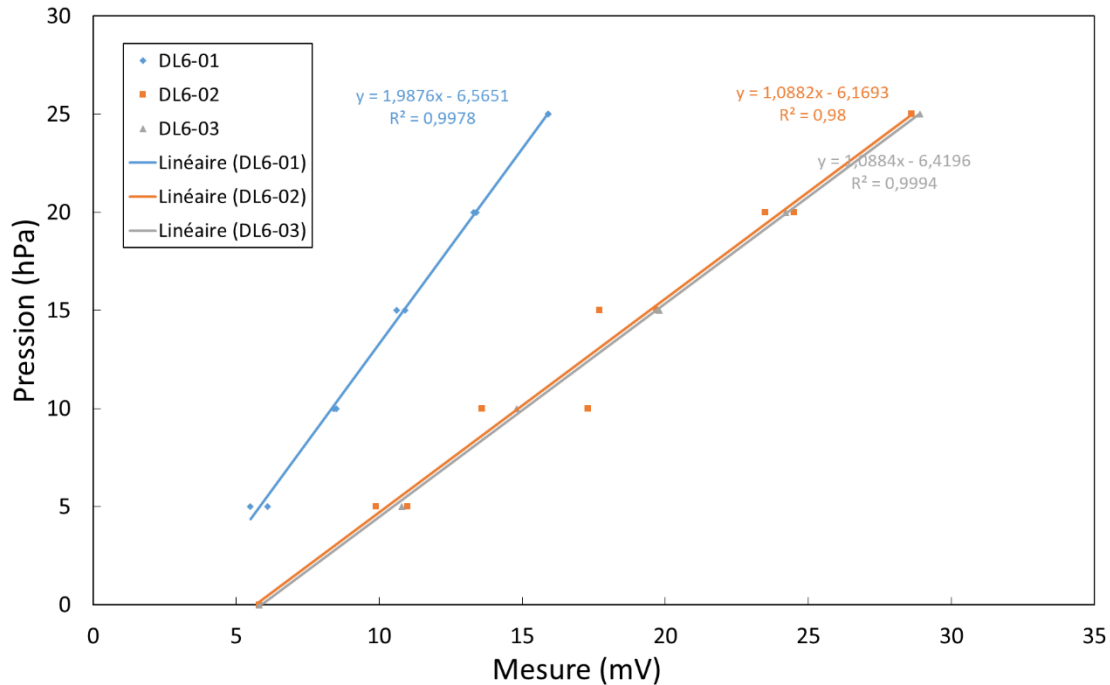


Figure 39 : Courbe de calibration des DL6

Par la suite, cette méthode de calibration réalisée en laboratoire ne mesure pas une succion (pression négative) comme sur le terrain, mais une hauteur d'eau (pression positive). De plus, elle est réalisée pour un seul tensiomètre type tandis qu'il y en a 18 installés sur le plan expérimental.

En bref, pour remédier à ces lacunes, une méthode de calibration réalisée sur le terrain a été entamée au cours de l'été 2019. En effet, elle consiste à prendre des lectures au même moment avec le Infield, soit un appareil portatif qui donne les valeurs en hectopascal et avec le DL6 afin de construire une courbe de calibration pour chacun des lysimètres. À l'heure actuelle, les résultats obtenus ne sont pas concluants. Il est important de mentionner que la calibration est un processus itératif, c'est pour cette raison que les résultats de la période analysée dans le cadre de ce mémoire sont traités selon les premières constantes obtenues. Éventuellement, les valeurs de succion seront modifiées.

5.3.3 Ouverture

À noter que des tensiomètres de type irromètres ont été installés dans le plan expérimental. Ils sont fabriqués par Irrrometer Co. Toutefois, il y a eu un problème au niveau de l'acquisition des données au cours de l'année 2018. En 2019, plus d'instruments ont été installés. Cependant, les données obtenues par cet instrument ne sont pas intégrées dans ce mémoire, car leur calibration n'est pas complète pour le moment. Éventuellement, ces instruments permettront de vérifier si les données fournies par les T4e sont cohérentes et si la saturation des T4e est adéquate. En d'autres termes, ils permettent d'établir la redondance des lectures et d'augmenter le nombre d'analyses.

5.4 SONDES DE TENEUR EN EAU

La teneur en eau est un aspect important à analyser pour savoir s'il y a une accumulation d'eau au sein du lysimètre et au pourtour. Ces sondes permettent de connaître la quantité d'eau présente dans les sols ainsi que de fournir des informations nécessaires à la reconstitution des courbes de rétention d'eau. Pour se faire, un couple de sondes est installé aux mêmes hauteurs que celles de la succion à la base et à la bouche du lysimètre. Un couple est placé dans les couches de surface pour caractériser les échanges qui se produisent avec l'atmosphère. Également, une sonde est mise à l'extérieur du lysimètre près du fond de l'excavation pour suivre l'accumulation d'eau. Cette section présente les explications liées au fonctionnement et la méthode utilisée pour la calibration.

5.4.1 Explication du fonctionnement

La teneur en volume volumétrique est mesurée par une sonde 5TM qui fabriquée par Meter (voir figure 40a). L'acquisiteur de donnée associé est le EM50 (voir figure 40b) également produit par Meter. Ce boîtier permet de connecter 5 sondes. Au sein des 4 lysimètres analysés, 26 sondes de 5TM et 6 EM50 ont été installés. Le 5TM détermine la teneur en eau volumétrique (VWC) en mesurant la constante diélectrique du sol. Également, ces sondes enregistrent la température, ce paramètre pourrait bonifier les travaux réalisés par l'équipe. Par exemple, en analysant la pénétration du gel dans le recouvrement des sites d'enfouissement.



Figure 40 : Sonde de teneur en eau
[Source : Meter, 2019]

5.4.2 Calibration des 5TM

La calibration détermine l'équation permettant la conversion des valeurs brutes exprimées en millivolt (mV) en teneur en eau volumétrique exprimée en pourcentage. Au laboratoire, des essais sont faits selon les principes de l'essai Proctor de la norme BNQ [2013]. Les essais de calibration ont été réalisés dans le moule Proctor standard avec 3 couches de sol qui ont été mises en place selon 10 coups exécutés avec la dame ayant un poids de 2,5 kg. Puis, la sonde 5TM est insérée dans le moule afin de prendre des lectures. En construisant un graphique de la teneur en eau volumique en fonction des lectures des sondes, il est possible de déterminer l'équation qui permet la conversion. Des essais ont été faits pour les différents sols utilisés lors de la construction : la terre végétale (*topsoil*), le sol de recouvrement (*cover material*), le sol contaminé de catégorie AB (*contaminated AB soil*) et le sol contaminé de catégorie BC (*contaminated BC soil*).

À noter que la plage de valeurs des lectures des sondes varie de 190 à 780 mV. À partir des résultats obtenus, différentes équations ont été étudiées : la polynomiale de degrés 2, la logarithmique et la puissance. De manière générale, les valeurs du R carré se rapprochent de 1, ce qui se signifie que le nuage de points est serré au tour de la droite de régression, ce qui est favorable. Les valeurs de R carré pour les différents sols sont présentées dans le tableau 8 selon les différents types de régression.

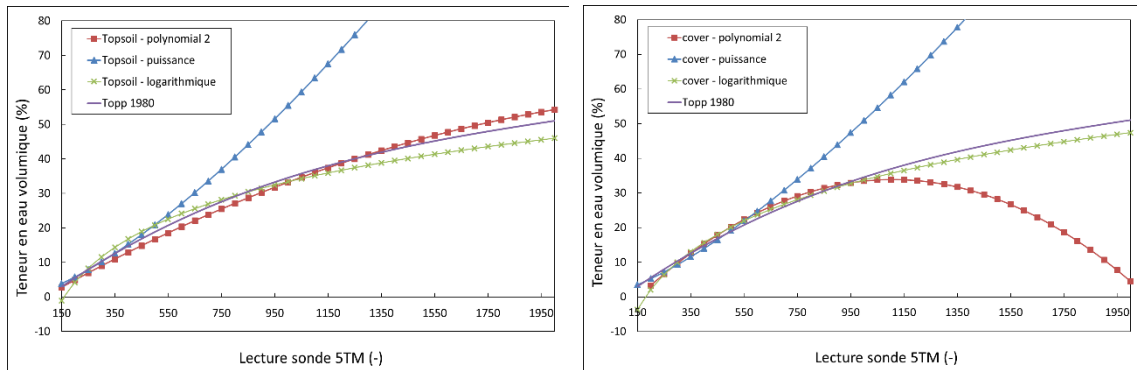
Tableau 8 : Valeurs du R carré des divers sols pour les différentes courbes de tendance

	Topsoil	Cover	AB soil	BC soil
Polynomial 2	0,964	0,947	0,907	0,963
Logarithmique	0,932	0,913	0,908	0,958
Puissance	0,978	0,904	0,895	0,959

Les différentes équations obtenues à partir des résultats sont présentées à la figure 41 pour les différents types de sol présents sur le chantier. En ce qui concerne le choix de l'équation pour la conversion, les modèles mathématiques ne permettent pas d'obtenir des données cohérentes, c'est-à-dire selon certains modèles, les valeurs de teneur en eau diminuent lorsque la lecture sonde augmente (polynomial 2), elles sont trop élevées (puissance) et elles sont négatives pour des lectures inférieures à 160 mV (logarithmique). L'équation développée par Topp en 1980 devient alors celle qui permet la meilleure conversion des valeurs brutes en teneur en eau volumétrique.

$$VWC = 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon_a^3 - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon_a^2 + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon_a - 5.3 \times 10^{-2} \quad \text{Équation 8}$$

Où ε_a est la permittivité diélectrique.



a) Terre végétale

b) Sol de recouvrement

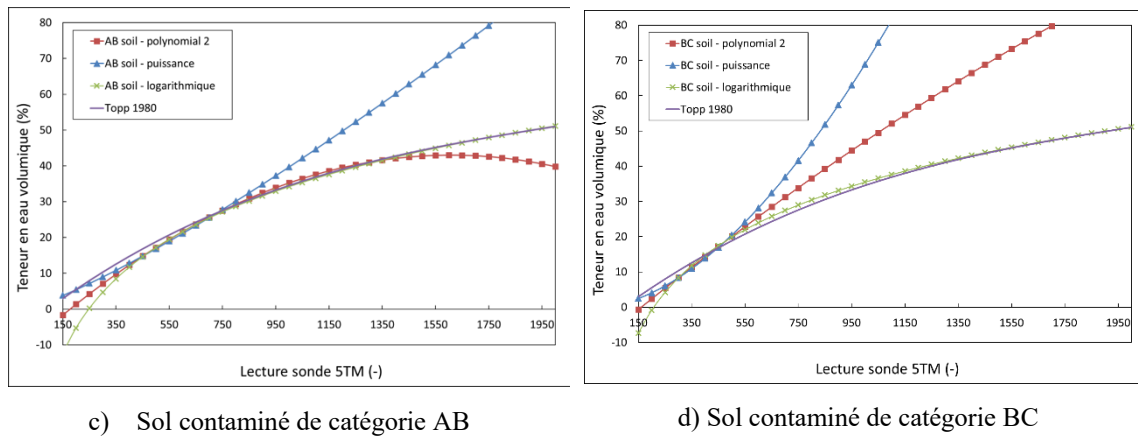


Figure 41 : Courbe de conversion des 5TM

5.5 PLAQUES DE TASSEMENT

Le rôle principal des plaques de tassement est de mesurer les changements d'épaisseur des différentes couches de sol afin de suivre l'évolution de la densité, de la perméabilité des sols et de la fonction de conductivité hydraulique [Abdolazadeh, 2011]. Le changement d'épaisseur se traduit par le changement de hauteur sur le terrain, quand il y a un glissement de parties distinctes l'une sur l'autre. Précisément, un poteau central cylindrique de métal auquel est soudé à une plaque de métal qui est installé au fond de l'excavation (voir figure 42a). Il constitue l'élément fixe du montage. Puis, lors d'une transition de sol, un second poteau avec un diamètre supérieur avec une plaque soudée est glissé sur le précédent. Il est important que la section du nouveau poteau sortant à la surface soit inférieure à la précédente afin qu'il soit possible de mesurer le tassement de chaque couche. Également, une plaque d'isolation est placée au-dessous de cette dernière (voir figure 42b) pour éviter la formation de glace sous la plaque de tassement durant l'hiver qui aurait comme effet de soulever la plaque. D'autres combinaisons plaques/poteaux peuvent être installés, s'il y a d'autres transition de sol. Le résultat des différents poteaux sortant à la surface est présenté à la figure 42c.



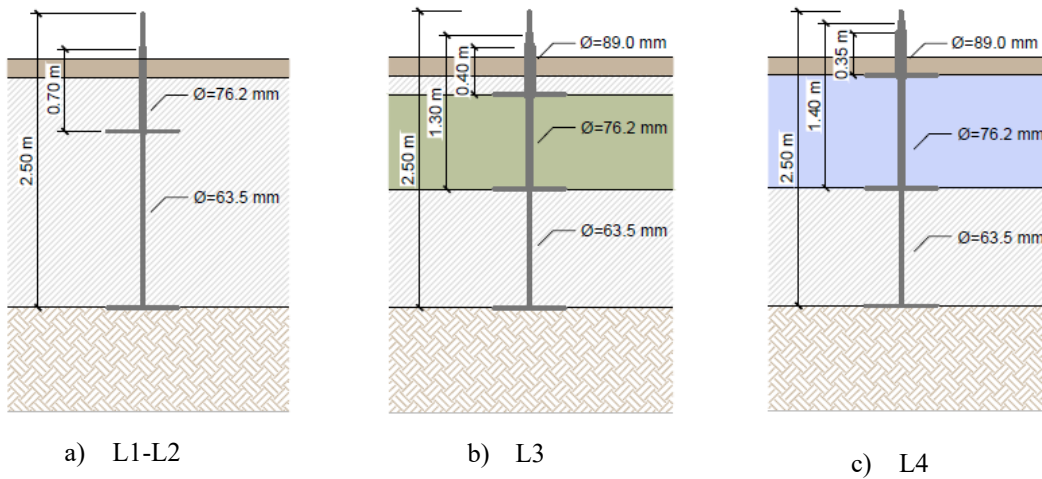
a) Base de la plaque

b) Plaque à la transition de couche avec isolation

c) Plaque sortant de la surface

Figure 42 : Différents éléments de la plaque de tassement

Il y a trois plaques de tassement installées dans ce plan expérimental, l'une dans l'enclos de L1- L2, et une dans L3 et L4. Les schémas des plaques de tassement à la figure 43.



a) L1-L2

b) L3

c) L4

Figure 43 : Représentation des plaques de tassement

6 CONSTRUIRE LES LYSIMÈTRES ET FAIRE LE CONTRÔLE POUR S'ASSURER DE LA QUALITÉ DE CONSTRUCTION

Ce chapitre aborde les détails pertinents de la construction des lysimètres. Un sommaire de la construction est inclus. Les étapes de construction et les leçons apprises sont expliquées brièvement, car plus de détails sont présents dans le rapport de construction transmis au partenaire industriel en février 2019 qui présente l'ensemble des travaux réalisés au cours de la première année du projet. Ce rapport se trouve à l'annexe C. La seconde section de ce chapitre présente les détails clés réalisés pour s'assurer du bon contrôle-qualité de ce plan expérimental.

6.1 SOMMAIRE DE LA CONSTRUCTION

La construction de ce plan expérimental a été un travail colossal. Il a impliqué plusieurs acteurs issus de différentes entreprises : étudiants, techniciens, professeur de l'Université de Sherbrooke, employés de l'entrepreneur général RGC Construction et travailleurs de Waste Management Inc. La figure 44 illustre une partie de l'équipe ayant contribué à la construction.



Figure 44 : Quelques personnes ayant contribué à la construction

En ce qui concerne l'échéancier du projet, la réalisation des étapes préliminaires a commencé à l'été 2017. Au printemps 2018, les travaux nécessitant l'intervention de machinerie lourde se sont réalisés de manière soutenue durant les mois de mai et de juin. Pour la suite de l'été 2018, les principales activités réalisées ont été les travaux de finition et d'ajustement, de démarrage des acquiseurs de données et de récupération des données.

De manière générale, ce plan expérimental contient plus 1000 m³ de sol, une soixantaine de sondes et senseurs, 13 acquiseurs de données et 2 stations météorologiques tel qu'expliqué au chapitre 8.1.1. Les figure 45 et Figure 46 illustrent le plan expérimental selon des vues aériennes pour le mois de juin (après la construction) et pour le mois de juillet 2018 (végétalisation en cours).



Figure 45 : Vue aérienne du plan expérimental en juin 2018



Figure 46 : Vue aérienne du plan expérimental en juillet 2018

6.2 ÉTAPES DE CONSTRUCTION

Les principales étapes de construction s'articulent autour : de l'excavation, de l'édification des coffrages en bois avec de la géomembrane et du géotextile, de la mise en place des sols (gravier, sable, matériau de recouvrement, sol contaminé de catégorie AB et BC) selon des couches ayant une épaisseur de 250 mm avec une densité approximative de 1600 kg/m³ et de l'installation de nombreux instruments.

Les différentes étapes sont présentées aux figure 47 à Figure 52. En plus du rapport de construction présent à l'annexe C, l'ensemble des photos prises lors de la construction sont disponibles à <https://photos.app.goo.gl/mYFp71qy9FWsrec59>. Également, l'ensemble des étapes de construction est présenté et expliqué dans un court vidéo déposé sur YouTube [youtube.com/watch?v=z4kyp8QCaII&feature=youtu.be](https://www.youtube.com/watch?v=z4kyp8QCaII&feature=youtu.be).



Figure 47 : Excavation. Chaque base des lysimètres est installée à la même élévation



Figure 48 : Installation du géotextile par-dessus la géomembrane



Figure 49 : Mise en place des couches de sol



Figure 50 : Compaction des couches de sol



Figure 51 : Installation de l'instrumentation



Figure 52 : Installation d'une plaque de tassement

6.3 LEÇONS APPRISSES

Au cours de la construction de ce plan expérimental, quelques modifications ont été faites aux plans initiaux selon la réalité du terrain et l'expérience des personnes impliquées dans la construction. Une première modification qui a été faite est l'ajout d'un drain à la base des lysimètres qui permet d'évacuer l'eau qui s'accumule. En d'autres termes, il s'agit d'un drain français qui est installé au périmètre du coffrage des lysimètres. Il est construit avec un géotextile dans lequel du gravier ½'' et un tuyau de 4'' perforé sont placés. La figure 53 présente la construction du drain. D'un point de vue pratique, ce drain évite l'effet de soulèvement qui aurait été causé par l'accumulation d'eau au pourtour des lysimètres et d'un point de vue scientifique, il permet de créer une pression égale à la pression atmosphérique, ce qui engendre l'équilibre des suctions à l'intérieur et à l'extérieur du

lysimètre. Pour les travaux futurs, il serait intéressant d'analyser le rôle de ce drain dans le comportement de l'eau et les impacts sur la méthode de conception à l'aide des modèles numériques.



Figure 53 : Installation du drain à la base du pourtour des lysimètres

À titre d'information, les tuyaux des drains mesurant le taux de percolation et ceux à la base du pourtour des lysimètres doivent être gérés selon leur risque de contamination. Alors, les tuyaux issus de L3 et L4 vu la présence de sols contaminés sont connectés avec la station de condensation (CS) 19 tandis que ceux des L1 et L2 sont drainés naturellement. La figure 54 présente la disposition des tuyaux de drainage.

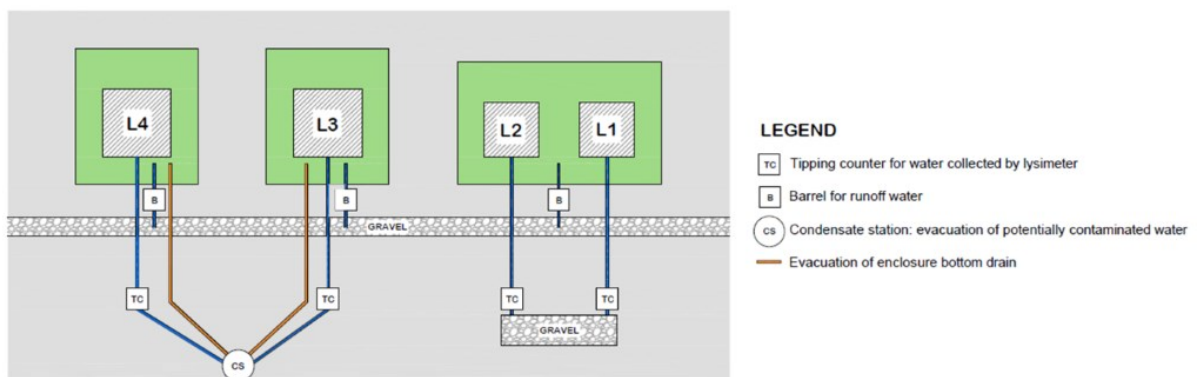


Figure 54 : Disposition des tuyaux de drainage

Une modification qui a été réalisée après la construction est au niveau des drains dédiés à la récupération des eaux de ruissellement. La figure 55 présente le premier drain construit durant la construction. En effet, les premiers drains construits avec du géotextile, du gravier et un tuyau perforé ne permettaient pas la collecte adéquate de l'eau de ruissellement, car le sol autour était perméable. En d'autres termes, l'eau ne pouvait pas s'accumuler et atteindre le tuyau pour être éventuellement récupérée. Par conséquent, un second drain a été mis en place. Ce dernier se situe directement sur la couche de terre végétale. Il est construit d'un tuyau coupé en deux et rempli de gravier (voir la figure 56). À noter que les deux drains sont connectés au même endroit tel que présenté à la figure 57.



Figure 55 : Vue générale du premier drain pour capter les eaux de ruissellement avant de mettre la couche de terre végétale



Figure 56 : Vue générale du deuxième drain pour capter les eaux de ruissellement



Figure 57 : Connexion des deux drains avant d'être remplie de gravier

6.4 ASSURANCE DU CONTRÔLE-QUALITÉ

Aucun détail n'a été laissé au hasard pour la construction de ce plan expérimental. Étant activement impliquée dans l'exécution des travaux sur le terrain et dans la conception du projet, l'équipe a construit ces lysimètres avec énergie, rigueur et passion. Elle était présente tous les jours sur le chantier afin d'assurer le contrôle qualité des travaux réalisés par l'entrepreneur général. Continuellement, au cours de la construction, des points de topométrie ont été enregistrés pour la réalisation des dessins de *tel que construit* faits sur AutoCAD. Également, la mise en place des sols respectait une procédure stricte. L'épaisseur de chaque couche de sol était validée à l'aide d'un niveau laser à pente pour s'assurer de la pente de 2% et la densité du sol était contrôlée après chaque mise en place. Les mesures de densité du sol ont été prélevées à l'aide de l'essai au cône de sable [BNQ, 2005] (voir figure 58) et d'un nucléodensimètre à l'occasion. Pour l'ensemble des couches analysées, la densité sèche oscille dans un intervalle de valeurs de 1600 kg/m³. Également, un « Journal de construction recueil de communication » a été rédigé chaque jour. Il contient les avancements journaliers et les détails notés sur le chantier concernant par exemple, la durée des travaux, les épaisseurs des couches, les emplacements précis des instruments, etc.



Figure 58 : Réalisation d'un essai de densité de cône de sable

De plus, pour s'assurer de la bonne réponse du plan expérimental, un mélange de sable silteux et de bentonite a été placé à la tête du périmètre des lysimètres tel qu'illustré à la figure 59a) ainsi qu'autour des fils des instruments (voir figure 59b)). L'objectif de ce mélange est d'éviter les chemins préférentiels qui pourraient fausser l'acquisition des données.



a) Autour des parois des lysimètres



b) Autour des fils des instruments

Figure 59 : Mélange de sable silteux et de bentonite

Un autre détail réalisé au chantier pour éviter la modification du chemin de l'écoulement est le fait que le géotextile a été coupé à un 1 m en dessous de la bouche du lysimètre tel qu'illustré à la figure 60.



Figure 60 : Géotextile coupé à 1 m en dessous de la bouche du lysimètre

7 S'ASSURER LA PERFORMANCE DES COMPOSANTES DES LYSIMÈTRES PENDANT LA PREMIÈRE ANNÉE

Sans contredit, l'hiver est rigoureux au Québec ! Au printemps 2019, de nombreuses réparations ont été accomplies sur le plan expérimental parce que la neige et le froid avaient endommagé certains éléments. Également, le retour du beau temps permettait d'apporter des améliorations au plan expérimental.

Dans un premier temps, pour mieux faire l'acquisition du taux de ruissellement, des contenants à auget basculeur ont été installés (voir figure 61a). Comme le nivellement de ces instruments est important, des fondations ont été construites avec du géotextile, du gravier et du bois pour garantir une bonne stabilité (voir figure 61 b). Également, les barils ont été nettoyés pour éliminer les impuretés causées par la fonte de la neige ce qui permet d'avoir un récipient propre pour la récupération de l'eau utilisée pour les analyses chimiques.



a) Vue à l'intérieur



b) Vue d'ensemble

Figure 61 : Barils de récupération du taux de ruissellement avec un contenant à auget basculeur

Deuxièmement, en ce qui concerne le système de récupération du taux de percolation du lysimètre, les tuyaux ont cassé pendant l'hiver tel qu'illustré à la **Error! Reference source not found.**figure 62a. Ipso facto, ils ont été coupés et les raccords ont été refaits. De plus, des supports de bois ont été installés pour réduire les flèches. Une fondation semblable à celle construite pour les barils de récupération du taux de ruissellement a été installée, toutefois une plaque de béton a été ajoutée pour permettre un meilleur nivellement. Les petits tuyaux d'exutoire ont été connectés au tuyau principal connecté à la station de condensation (CS) 19 dans le cas du L3 et du L4 tandis que pour L1 et L2, ils ont été éloignés de la chaudière vers le talus en aval. La figure 62b illustre le cas de L1 pour l'ensemble des différentes réparations faites au niveau des chaudières.



a) Bris causé par l'hiver

b) Assemblage typique (L1 illustré)

Figure 62 : Modifications faites aux tuyaux de récupération du taux de percolation

Également, une attention particulière a été portée à la surface des enclos. Les drains permettant de récupérer le taux de ruissellement ont été nettoyés, car des sédiments s'y étaient accumulés et du nouveau gravier a été ajouté (voir figure 63a). De plus, le tassement naturel des sols a causé des petits tassements différents nuisant au bon écoulement de surface. Alors, du sol de type en support à la végétation (*top soil*) a été utilisé pour effectuer le profillement de la pente. À noter que la mise en place a été faite à l'aide d'un niveau laser pour maintenir une pente de 2 %. La figure 63b présente le résultat final de l'enclos de L1 et L2.



a) Drain pour capter les eaux de ruissellement

b) Profilement de la surface

Figure 63 : Modifications faites à la surface des enclos

De plus, tous les fils de connexion des instruments ont été fixés à leur poteau pour éviter que le poids de la neige ne les débranche et interrompe l'enregistrement à l'exception de ceux des tensiomètres parce qu'ils ne font pas l'acquisition de données durant l'hiver. La figure 64 présente cette modification. Dans un second ordre d'idée, les protections des mousses de polystyrène des fils ont été inspectées et les morceaux abimés ont été remplacés. De surcroît, toutes les connexions des fils dans les ports des acquiseurs de données ont été vérifiées afin qu'elles soient conformes avec l'identification des fils et des ports déterminés en 2018 (pour faciliter le traitement de données). La figure 65 présente un EM50 et le bon positionnement des fils selon l'identification établie en 2018.



Figure 64 : Fils de connexion d'un Hobo fixé à son poteau



Figure 65 : Fils positionnés avec l'identification déterminée en 2018

8 TRAITER ET INTERPRÉTER LES DONNÉES INITIALES FOURNIES PAR LES INSTRUMENTS

Ce chapitre traite et interprète les données initiales fournies par les différents instruments installés dans les quatre lysimètres analysés. Dans un premier temps, la réponse générale est exprimée afin de confirmer le comportement cohérent du plan expérimental. Par la suite, une analyse au niveau des sondes de teneur en eau et de succion est réalisée pour comparer les valeurs avec le taux de précipitation et de percolation. Également, les courbes de rétention d'eau sont reconstituées à partir des résultats obtenus afin de connaître le comportement des sols non saturés *in situ*. De plus, au cours de cette première année, différents phénomènes au niveau de la lecture des instruments ont été recensés. Puis, une section importante de ce mémoire est celle traitant des réponses préliminaires aux besoins du partenaire industriel.

8.1 RÉPONSE GÉNÉRALE DU PLAN EXPÉRIMENTAL

La présentation générale des résultats obtenus permet d'exposer le comportement du plan expérimental pour la période d'analyse qui est de 29-06-2018 au 28-06-2019. Le 29-06-2018 correspond à la date où la majorité des acquisseurs de données enregistrait. Les résultats de cette première année d'acquisition de données illustrent que les valeurs sont généralement faibles. Il est vrai que quelques erreurs se sont produites et que des instruments ont arrêté de fonctionner, mais ces lacunes ont été ou seront corrigées.

8.1.1 Résultats des données météorologiques

Les stations météorologiques installées sur le site enregistrent de nombreux paramètres tels que la température, la vitesse des vents, la radiation solaire, les précipitations, etc. Dans le cadre de ce mémoire, uniquement les résultats des précipitations sont présentés, car il s'agit du paramètre qui influence plus le taux de percolation dans le sol. Le début de l'acquisition pour les stations météorologiques installées sur le terrain est le 20-07-2018. Les données obtenues par les deux stations météorologiques sont présentées à la figure 66 et elles sont

incomplètes, car il y a eu des petits problèmes par exemple avec les piles, la communication entre la station et la console, etc. Les périodes de non-enregistrement et les causes sont présentées dans le tableau 9. Les données fournies par Environnement Canada sont également présentées à la figure 66. À savoir que ce sont ces données qui sont utilisées pour effectuer l'analyse de la percolation de ce mémoire puisqu'elles sont complètes. À titre d'analyse, les stations installées sur le terrain fournissent des résultats cohérents avec celles d'Environnement Canada. Les stations utilisées pour ce projet enregistrent les événements de pluie la même journée, mais avec des intensités moindres, les causes de ces différences peuvent être nombreuses : vent, intensité des précipitations vu les kilomètres qui séparent les deux endroits, instrument, calibration, etc. En ce qui concerne la comparaison des deux stations *in situ*, elle fournit des résultats similaires.

Tableau 9 : Détails des périodes de non-enregistrement pour les stations météorologiques

Station	Début	Fin	Commentaires
Près des lysimètres	2018-10-11	2018-10-11	Pas d'enregistrement pour cette journée
	2018-11-24	2018-12-12	Problème de batteries
	2018-12-13	2018-12-15	Données aberrantes pour la température
	2019-01-10	2019-02-14	Problème de batteries
	2019-03-14	2019-04-10	Problème de batteries
	2019-05-09	2019-05-09	Pas d'enregistrement pour cette journée
Près de l'étang	2018-10-11	2018-10-11	Pas d'enregistrement pour cette journée
	2018-11-24	2018-12-12	Problème de batteries
	2019-01-10	2019-02-04	Problème de batteries
	2019-03-10	2019-03-10	Pas d'enregistrement pour cette journée
	2019-03-14	2019-04-28	Problème de batteries
	2019-05-25	2019-06-25	Problème de batteries

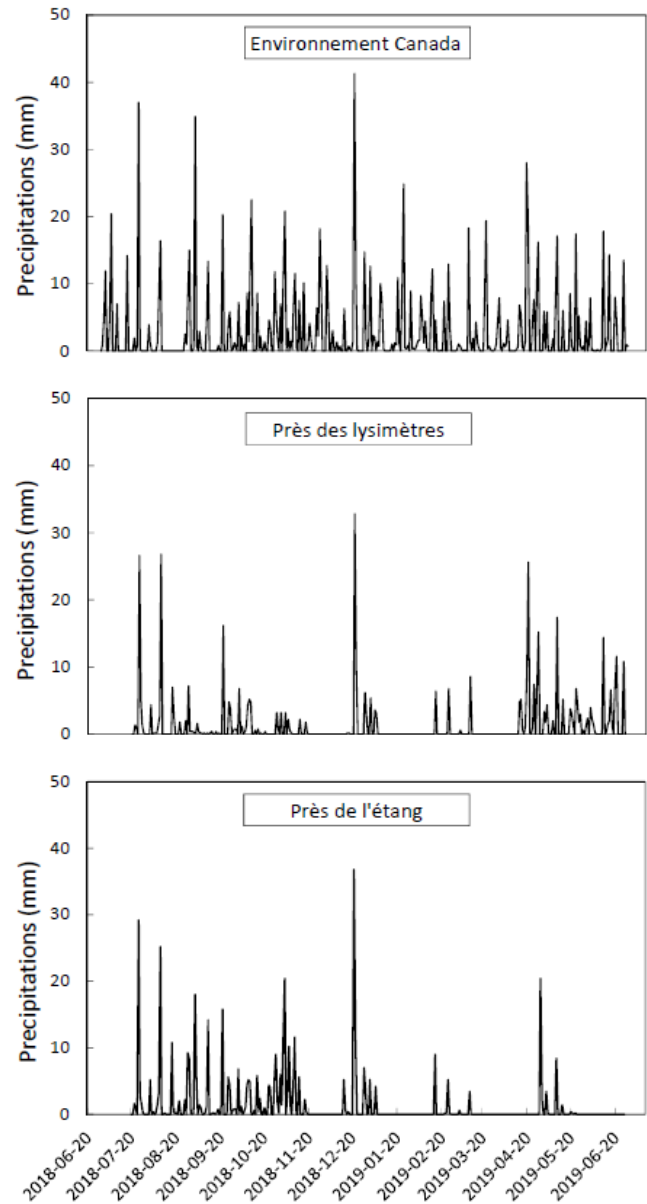


Figure 66 : Données du taux de précipitation pour la période d'analyse

Dans un autre ordre d'idées, les stations actuelles installées sur le terrain fournissent uniquement les valeurs liées à la pluviométrie. En d'autres termes, elles ne possèdent pas les dispositifs nécessaires pour mesurer la neige. Toutefois, au sein du groupe de recherche, des personnes s'occupent de mesurer l'épaisseur du couvert de neige sur le site d'enfouissement par carottage. Les résultats pour cette première année d'analyse sont insuffisants, mais, pour le futur, il sera possible de les intégrer aux données fournies par

les stations météorologiques. Toutefois, dans le cas d'Environnement Canada, les résultats combinent les précipitations liées à la pluie et à la neige.

8.1.2 Résultats globaux pour chaque lysimètre

Pour la période d'analyse, les acquiseurs des données n'ont pas enregistré l'ensemble des données du 13-10-2018 au 24-10-2018. Tous les instruments du chantier avaient été arrêtés pour la préparation hivernale. Après réflexion, il n'était pas nécessaire de tous les arrêter, seulement les T4e sont sensibles au gel. Également, les EM50 n'ont pas enregistré les données à différentes périodes telles que présentées au tableau 16. Le poids de la neige sur le fils est le principal responsable de ces arrêts. Comme les T4e sont sensibles au gel, ils ont été enlevés à la fin du mois de septembre 2018 pour être remplis de nouveau à la fin du mois de mai 2019 (voir le tableau 17). En ce qui concerne les contenants avec un auget basculeur, ils ont cessé d'enregistrer principalement à cause de mauvais nivellement de l'instrument qui empêchait l'auget de basculer de fonctionner adéquatement (voir tableau 18).

Les données obtenues pour les différents instruments sont présentées en fonction de chaque lysimètre aux Figure 98 à Figure 101 de l'annexe A. Elles illustrent respectivement les graphiques du taux de précipitation, du taux de percolation, les valeurs de la teneur en eau volumétrique et de la succion en fonction du temps. De manière générale, les instruments installés fournissent une réponse cohérente selon la pluviométrie et le comportement du sol. Par exemple, la teneur en eau pour la sonde installée à 250 mm du fond est plus élevée que celles installées à 350 mm. Également, lorsque la teneur en eau augmente pour les sondes installées au fond du lysimètre, des données du taux de percolation sont recueillies. De plus, les valeurs de succion pour les instruments installés à la base sont dans le même ordre de grandeur pour tous les lysimètres, et ce pour toute la période d'analyse. Ces valeurs sont plus faibles que celles des instruments installés à la bouche comme la présence d'eau est plus importante dans le fond des lysimètres. À noter que les valeurs de succion pour une partie de l'année 2018 sont irrégulières, des problèmes de saturation en sont probablement la cause. Plus de détails sont fournis à la section 8.4.1. Les valeurs des sondes de teneur en eau installées à la surface pour les quatre lysimètres sont présentées à la figure 102 de l'annexe A. Les courbes présentent de fortes oscillations particulièrement

celle installée dans la couche de sol végétal comme elle est davantage influencée par les changements atmosphériques.

8.1.3 Résultats des plaques de tassement

Comme expliqué précédemment les plaques de tassement sont installées dans les enclos afin de mesurer un éventuel tassement du sol mis en place. Les lectures recueillies des différentes plaques de tassement lors de la période d'analyse sont présentées à la figure 67. Au sein des différents lysimètres, les lectures sont demeurées constantes dans le temps, les variations relevées sont dues à la précision de la lecture du ruban à mesurer utilisé sur le chantier. Dorénavant, pour réduire cette source d'erreur, un pied à coulisse sera utilisé. En bref, il n'y a pas de changement significatif dans le tassement des couches, ce qui se traduit par une densité inchangée. Par conséquent, il n'est donc pas nécessaire d'ajuster le coefficient de perméabilité saturé (K_{sat}) tel que suggéré dans l'article de Terzaghi et Peck [1967]. Cependant, il est important de continuer à évaluer ce paramètre afin de s'assurer que cette situation reste constante.

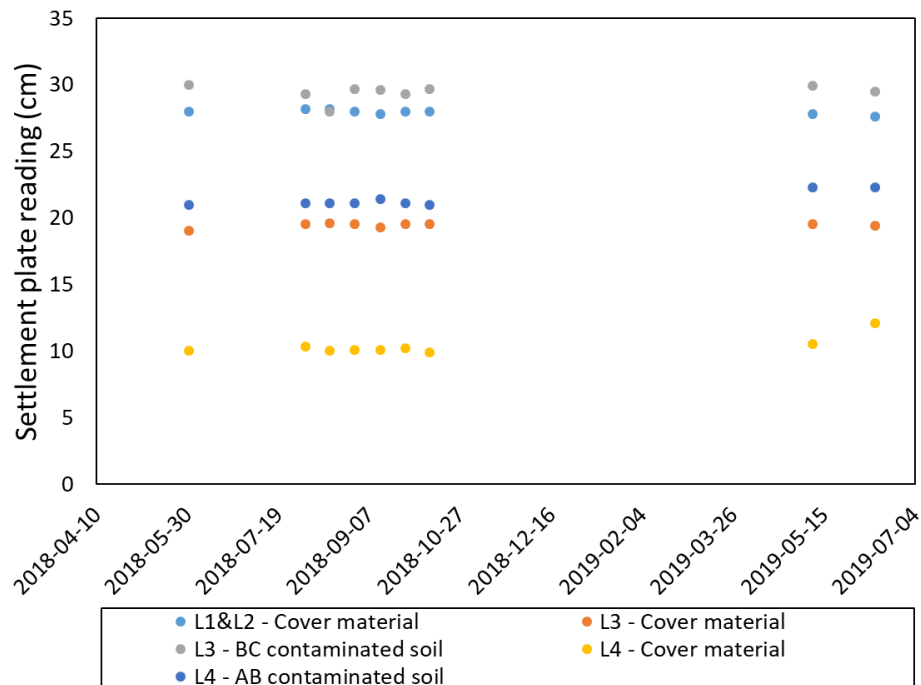


Figure 67 : Valeurs des lectures des plaques de tassement

8.2 ANALYSE DES RÉSULTATS

À partir des données obtenues pour la période d'analyse de 29-06-2018 au 28-06-2019 pour la teneur en eau, la succion, les taux de précipitations et de percolation, des graphiques sont produits pour étudier le comportement complet du plan expérimental. Une sélection des données de 2019 est faite pour s'assurer d'avoir des données pertinentes. Pour l'analyse de teneur en eau, les données compilées sont celles de 2019 (17-04-2019 au 28-06-2019) et l'analyse de la succion est faite du 28-05-2019 (L1&L2, L3) / 07-06-2019 (L4) au 28-06-2019, car le problème de saturation n'est pas présent à ce moment. Aussi, les comparaisons ne sont pas faites pour L1 puisqu'il n'y a aucune sonde de teneur en eau et de succion installées à la bouche du lysimètre.

8.2.1 Analyse des résultats de teneur en eau

D'une part, des comparaisons entre les deux sondes de teneur en eau soit l'une installée à l'intérieur de la bouche du lysimètre et l'autre installée au fond et les taux de précipitation sont faites. Les figure 68 à Figure 70 présentent ces comparaisons. Toutes les sondes installées près de la surface répondent bien aux changements atmosphériques. En effet, lorsqu'il y a des précipitations, il y a une augmentation dans les valeurs de teneur en eau. Pour L2 et L3, cette augmentation se produit également pour les sondes installées au fond du lysimètre, mais avec un décalage dans le temps. Ce phénomène est explicable par le fait que l'eau doit percoler dans le sol avant d'atteindre ces sondes. En ce qui concerne L4, les valeurs de teneur en eau de la sonde installée à la surface sont plus faibles que celle installée à la surface, ce qui peut être expliqué par la présence d'une barrière capillaire. Autrement dit, l'eau s'accumule dans la couche fine de sol contaminé de catégorie AB qui est un silt sableux avant de percoler dans la couche inférieure plus grossière du matériau de recouvrement qui est un sable silteux.

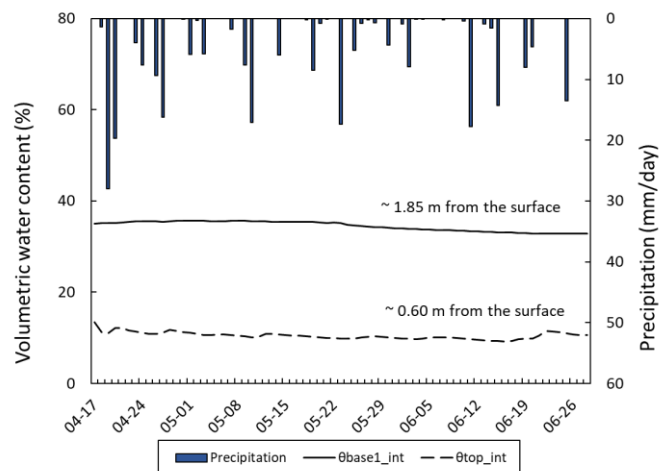


Figure 68 : Comparaison entre les 2 sondes de teneurs en eau à différentes profondeurs et le taux de précipitation - L2

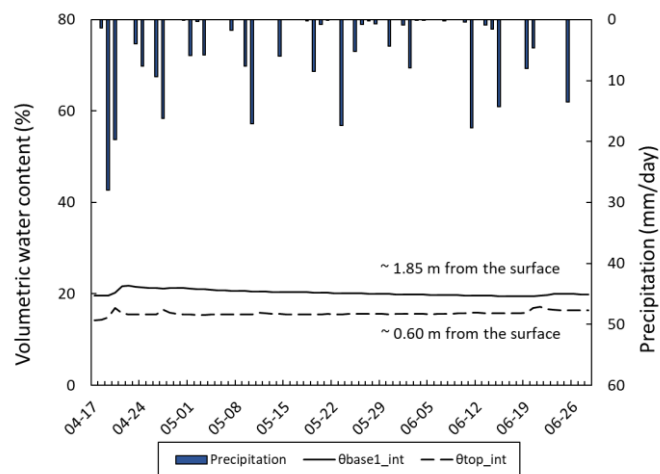


Figure 69 : Comparaison entre les 2 sondes de teneurs en eau à différentes profondeurs et le taux de précipitation - L3

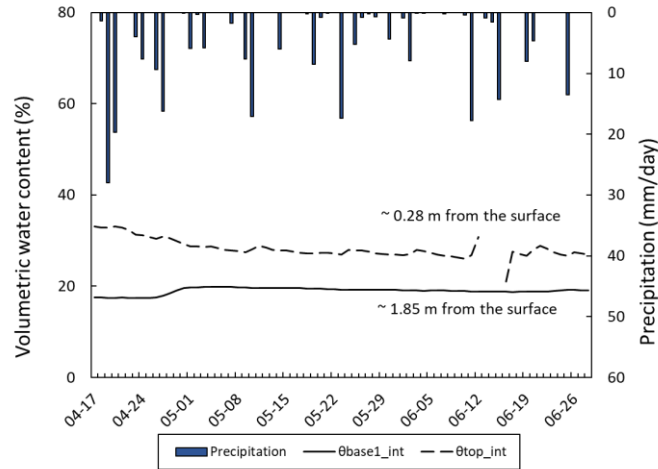


Figure 70 : Comparaison entre les 2 sondes de teneurs en eau à différentes profondeurs et le taux de précipitation - L4

D'une autre part, les Figure 71 et Figure 72 présentent une comparaison entre les sondes de teneur installées au fond et le taux de percolation. Tout d'abord, les sondes installées à 250 mm du fond du lysimètre ont des valeurs de teneur en eau plus élevées que celles installées à 350 mm, ce qui est normal puisqu'il y a une accumulation d'eau au lysimètre vu la présence de la barrière capillaire. Également, il est possible de remarquer que les courbes du taux de percolation ont un comportement similaire à celles de teneur en eau. Autrement dit, plus les valeurs de teneur en eau sont élevées, plus le taux de percolation est important.

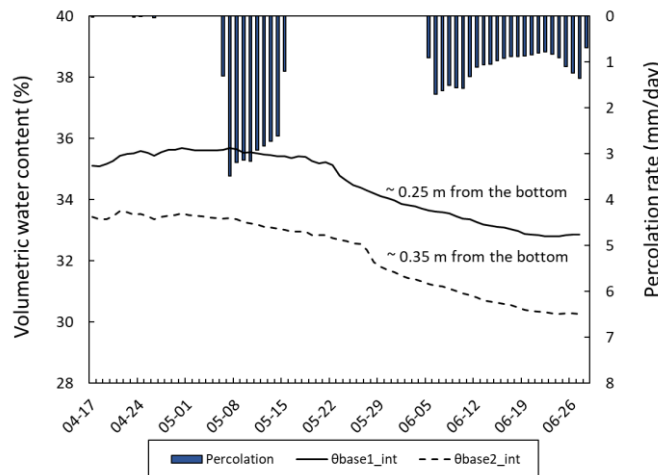


Figure 71 : Comparaison entre les 2 sondes de teneurs en eau au fond et le taux de percolation - L2

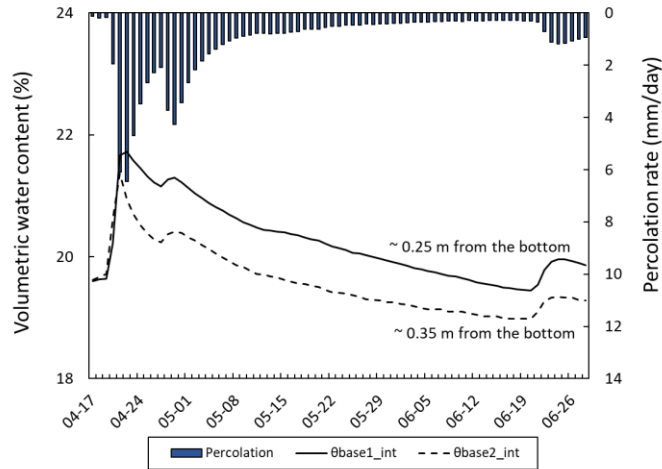


Figure 72 : Comparaison entre les 2 sondes de teneurs en eau au fond et le taux de percolation - L3

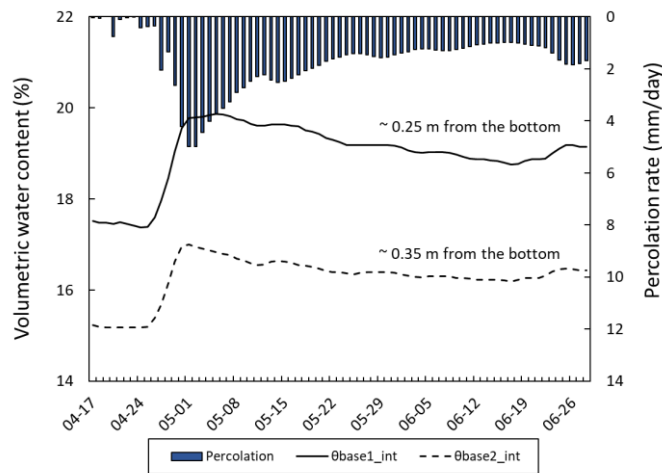


Figure 73 : Comparaison entre les 2 sondes de teneurs en eau au fond et le taux de percolation - L4

8.2.2 Analyse des résultats de la succion

Tel que réalisé pour les résultats de teneur en eau, des comparaisons entre les deux sondes de succion soit l'une installée à l'intérieur de la bouche du lysimètre et l'autre installée au fond et le taux de précipitation sont réalisées. Dans le cas de L2 et L4 (voir figure 74 et Figure 76), les sondes installées au fond ont des valeurs de succion plus élevées que celles installées à la bouche du lysimètre, ce qui est cohérent comme il y a potentiellement une accumulation d'eau au fond du lysimètre. Également, les sondes installées à la surface sont influencées par les précipitations. Par exemple pour L2, il y a un creux entre le 02-06-2019 et le 11-06-2019, ce qui correspond à une période sans précipitation, donc la succion

diminue. Ce phénomène est observable pour d'autres périodes et dans L4 aussi. En ce qui concerne L3 (voir figure 75), ce phénomène est inversé et à l'heure actuelle, la cause est inconnue, donc une attention particulière sera portée à cette situation dans les prochaines analyses.

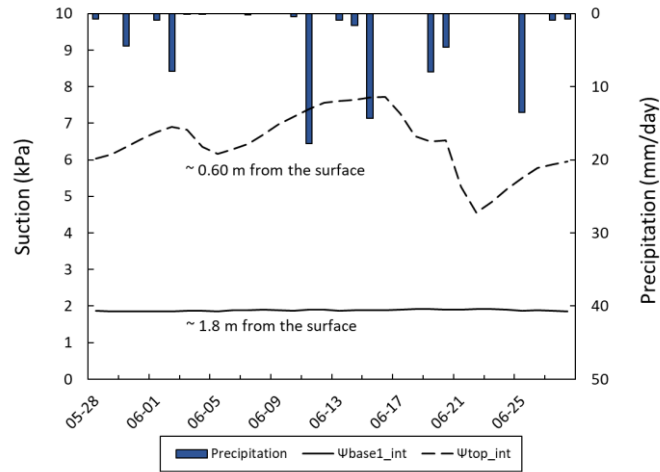


Figure 74 : Comparaison entre les 2 sondes de succion à différentes profondeurs et le taux de précipitation - L2

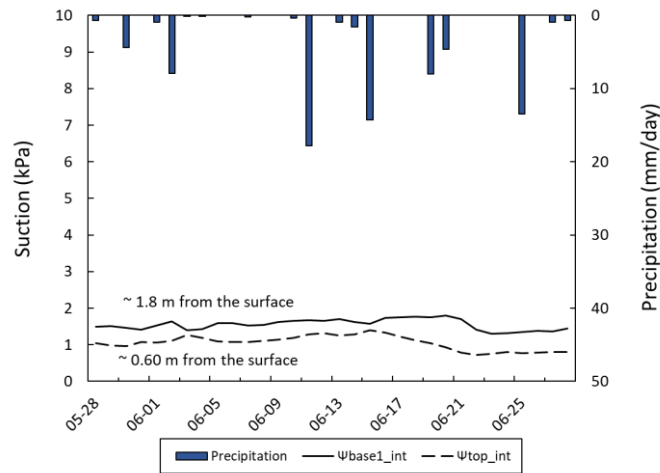


Figure 75 : Comparaison entre les 2 sondes de succion à différentes profondeurs et le taux de précipitation - L3

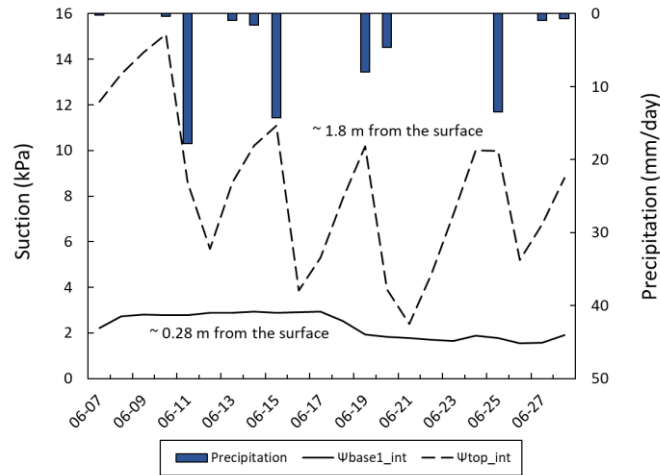


Figure 76 : Comparaison entre les 2 sondes de suction à différentes profondeurs et le taux de précipitation-
L4

Dans un autre ordre d'idées, la comparaison entre les sondes de suction installées à la bouche du lysimètre est faite pour évaluer le phénomène de diversion latérale, un aspect important de vérification pour la conception des lysimètres selon la méthode développée par Parent et *al.* [2006]. Le graphique pour L2 et L4 est présenté respectivement aux figure 77 et Figure 79 et les courbes ont un comportement similaire, ce qui signifie que les lysimètres fonctionnent bien. Pour le L3 (voir figure 78), ici aussi, une analyse plus profonde sera nécessaire pour bien comprendre le comportement.

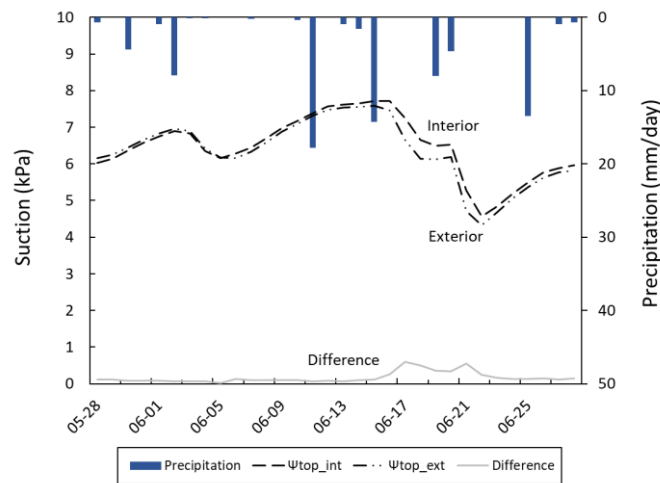


Figure 77 : Comparaison entre les 2 sondes de suction à la bouche du lysimètre et le taux de précipitation -
L2

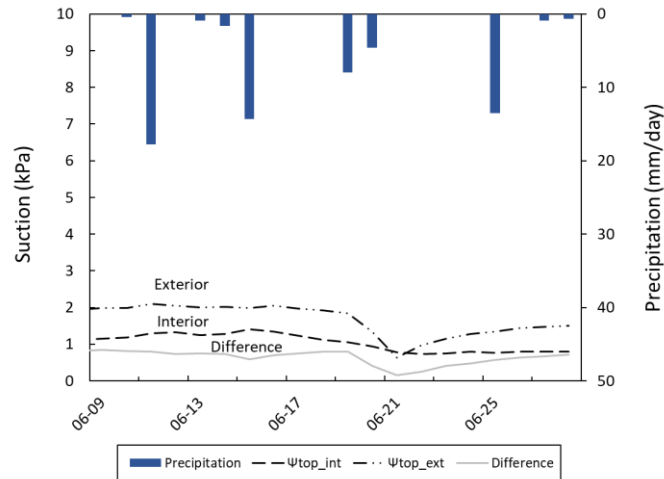


Figure 78 : Comparaison entre les 2 sondes de succion à la bouche du lysimètre et le taux de précipitation - L3

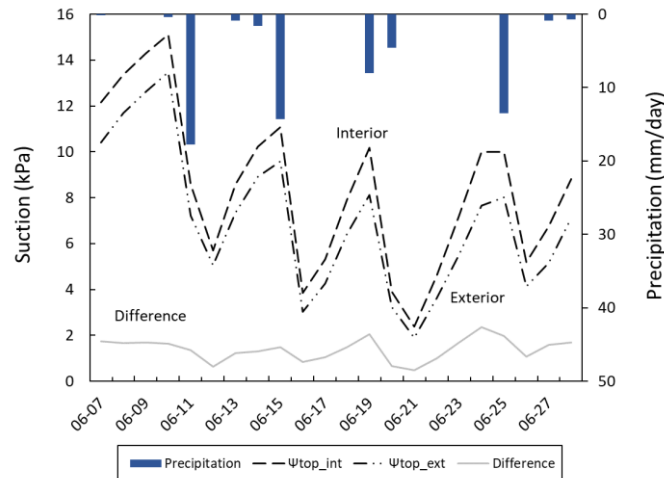


Figure 79 : Comparaison entre les 2 sondes de succion à la bouche du lysimètre et le taux de précipitation - L4

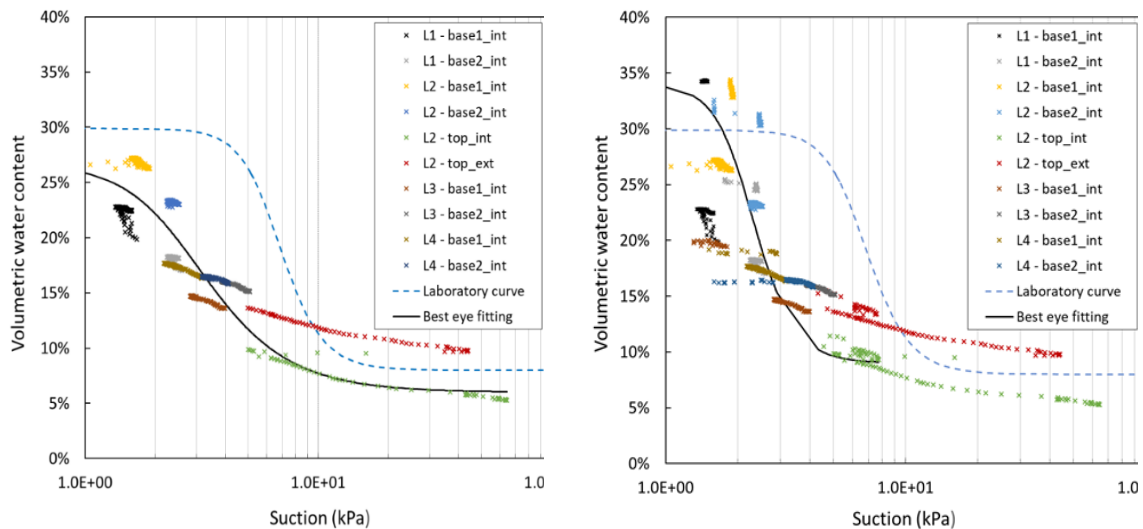
Également, la différence entre les courbes a été calculée pour mieux représenter l'écart entre les courbes. Elle présente dans les graphiques par une ligne continue. De manière générale, les valeurs sont minimales, soit de l'ordre de 1 et 2 kPa, ce qui peut être lié à la sensibilité de l'instrument ou même à la calibration. Toutefois, il est intéressant de remarquer que les valeurs de la différence diminuent lorsqu'il y a des événements de pluie.

De plus, il aurait été intéressant d'analyser les sondes de teneur installées au fond en comparant le taux de percolation, toutefois pour l'instant, les périodes où le taux de percolation et la succion sont enregistrés sont insuffisantes pour établir des conclusions.

8.3 RECONSTITUTION DE LA COURBE DE RÉTENTION D'EAU À PARTIR DES DONNÉES DU TERRAIN

Pour la période d'analyse (29-06-2018 au 28-06-2019), les résultats obtenus pour les valeurs de teneur en eau et de succion permettent de constituer les courbes de rétention d'eau (CRE) des sols *in situ*. Effectivement, cette pratique permet de connaître le comportement réel des sols non saturés mis en place dans le plan expérimental. Pour effectuer la reconstitution des CRE, il suffit d'introduire les valeurs du terrain dans le fichier Excel d'interprétation et d'effectuer un ajustement visuel (*best eye fitting*), dans ce cas-ci, des paramètres de van Genuchten afin d'obtenir une courbe qui se rapproche de celle obtenue en laboratoire. Il est à noter que pour ces reconstitutions les valeurs du coefficient de perméabilité saturée obtenues en laboratoire ont été utilisées. Les courbes présentées ci-dessous sont préliminaires, car la calibration des T4e (instrument donnant les valeurs de succion) n'est pas finale.

Pour le matériau de recouvrement (*cover material*), une courbe considérant uniquement les résultats obtenus en 2018 est présentée à la figure 80a tandis que la figure 80b présente les valeurs de 2018 ainsi qu'une partie de 2019 (jusqu'au 28-06-2019). De toute évidence, la seconde courbe ayant plus de valeurs d'un sol humide (teneur en eau plus élevée) permet d'obtenir une courbe se rapprochant de celle obtenue en laboratoire.



a) 2018

b) 2018-2019

Figure 80 : CRE reconstituée du matériau de recouvrement

À partir des courbes de rétention d'eau, les fonctions de conductivité hydraulique sont tracées et elles sont présentées à la figure 81. La courbe de 2019 a un décalage avec celle obtenue en laboratoire. En effet, les valeurs d'entrée d'air (α) sont différentes, mais les paramètres liés à la pente de désaturation (n) semblent parallèles. Cet écart est expliqué par le fait qu'il y a peut-être des macrofissures sur le terrain, que Hyprop a ses limitations, etc. Il faut rappeler que lorsque les courbes de calibration des DL6 seront complétées et que la gestion des données en fonction de l'effet de la radiation solaire faite, il sera possible de mettre à jour ces courbes. Entre temps, ces courbes sont préliminaires.

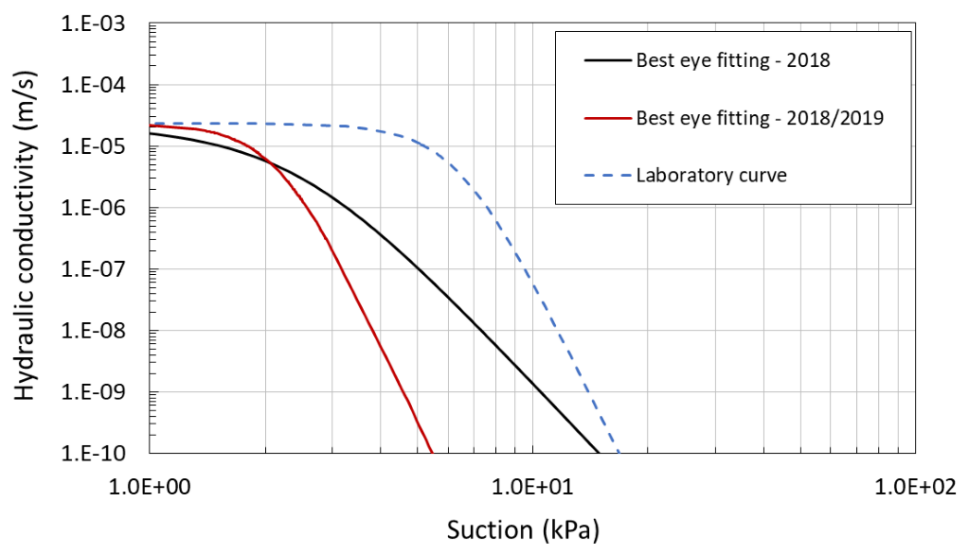
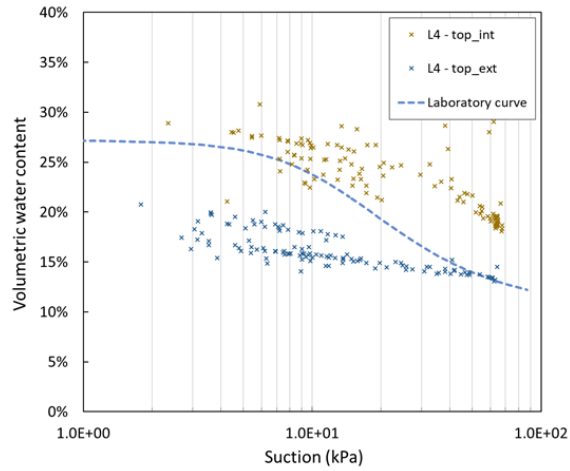
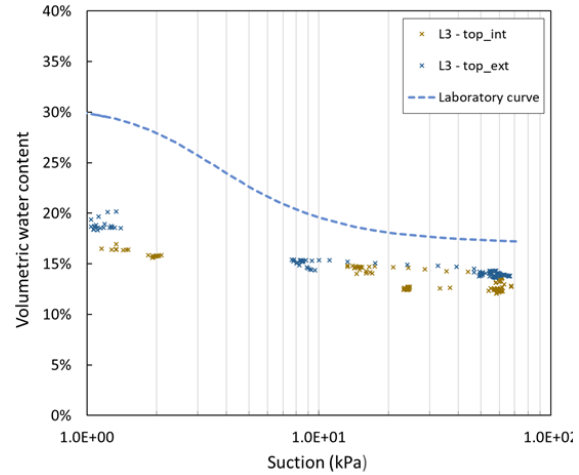


Figure 81 : Fonction de conductivité hydraulique pour le matériau de recouvrement

En ce qui concerne la reconstitution des courbes des sols contaminés de catégorie AB et BC, les données sont insuffisantes pour tracer les courbes. Les courbes sont présentées respectivement à la figure 82. Pour obtenir une meilleure estimation, il faudrait ajouter des sondes de teneur en eau et de succion dans les couches de sol contaminé de catégorie AB et BC sur le terrain, ce qui permettrait d'obtenir plus de valeurs pour les sols humides, c'est-à-dire ceux ayant des succions plus faibles.



a) Sol contaminé de catégorie AB
2018-2019



b) Sol contaminé de catégorie BC
2018-2019

Figure 82 : CRE reconstituée du sol contaminé de catégorie AB et BC à partir des données de 2018 et une partie de 2019

En bref, les instruments installés sur le terrain offrent un large potentiel d'informations et la reconstitution de la courbe de rétention d'eau n'est qu'un exemple.

8.4 APPRENTISSAGES DE LA PREMIÈRE ANNÉE

La première année d'acquisition de données a permis de réaliser des apprentissages majeurs. Le premier est que la saturation des instruments de succion (T4e) est une tâche essentielle qui doit être réalisée régulièrement pour maintenir le système saturé et ainsi obtenir des valeurs cohérentes. Le second est lié à l'effet de la radiation solaire sur l'acquisiteur de données ou les fils de branchement, car le signal est alors influencé.

8.4.1 Influence de la saturation sur la lecture des T4e

Au cours de 2018, une méthode de saturation pour les T4e avait été élaborée. Cette dernière consistait à remplir les T4e avec de l'eau désaérée à l'aide d'une seringue jusqu'à ce que l'eau ressorte dans l'autre tuyau sans bulle d'air (voir figure 83).



Figure 83 : Méthode de saturation des T4 à l'aide d'une seringue

La Figure 84 présente les données de succion obtenues au 30 minutes pour les 4 lysimètres de 2018. La méthode de saturation expliquée précédemment comporte quelques lacunes. Tout d'abord, il est possible de remarquer que lors de la saturation pour L2 et L3, il y a une chute de la succion pour les instruments installés à la bouche des lysimètres, ceux plus sensibles aux changements de température. Ce phénomène s'explique par le fait que les instruments ne sont pas saturés régulièrement. Effectivement, les dates de saturation des instruments sont identifiées par les lignes vertes verticales dans les graphiques de la figure 84. Il est possible de constater que le délai entre les saturations était trop long, par exemple il s'est écoulé plus d'un mois entre la première et la deuxième saturation. Les dates de saturation pour l'année 2018 sont les suivantes :

- 27-06-2018
- 03-08-2018
- 30-08-2018
- 13-09-2018
- 27-09-2018

Cette absence de saturation régulière est critique considérant que l'acquisition des données s'est fait pendant l'été où la chaleur rend le sol plus sec, ce qui fait en sorte que le sol a une succion plus importante et qu'il désature davantage la pierre poreuse du T4e.

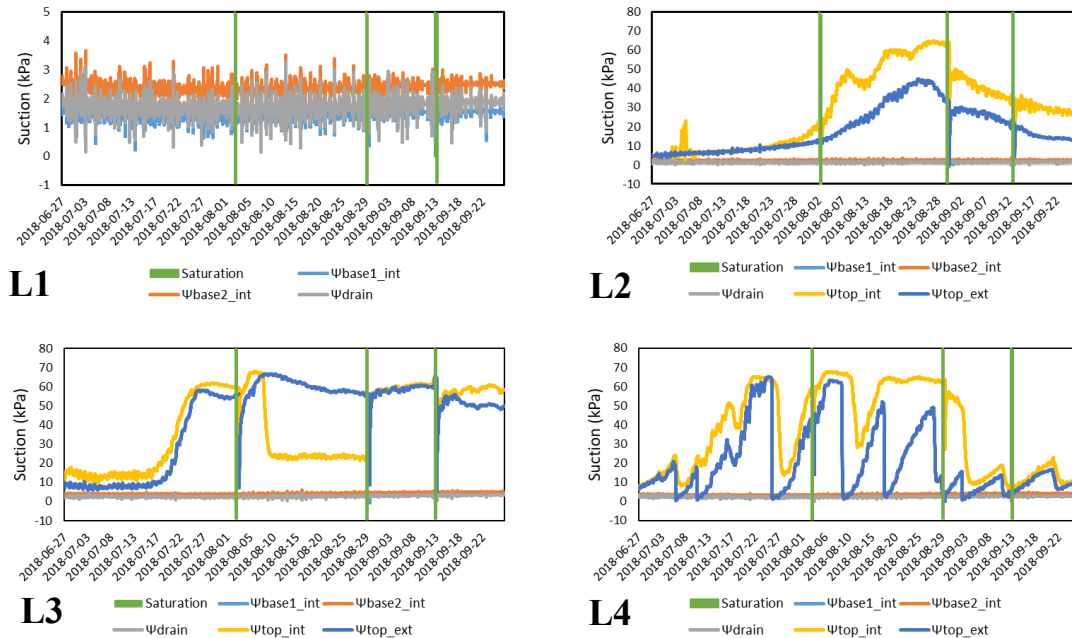


Figure 84 : Données de succion pour les 4 lysimètres pour 2018

Les valeurs pour les deux instruments installés à la bouche des lysimètres se situent dans le même intervalle, soit entre 10 et 20 kPa pour le début de l'acquisition (28-06-2018) et les courbes ont un comportement semblable. Toutefois, pour le L4, à partir du 12-07-2018, les valeurs augmentent de manière considérable pour atteindre des valeurs de succions de l'ordre de 60 kPa et les courbes ne se comportent plus de la même manière. Ces mêmes phénomènes se produisent pour L2 et L3, mais plus tard, soit à partir du 27-07-2018. Comme les sondes sont installées moins près de la surface que celles présentes dans L4, elles sont alors moins sensibles aux changements de température.

Pour remédier aux lacunes de la méthode développée en 2018, une nouvelle méthode de saturation des instruments a été réalisée en 2019. Désormais, la pompe à vide a été ajoutée pour retirer toutes bulles d'air des T4 tel qu'illustré à la figure 85. Cette méthode permet

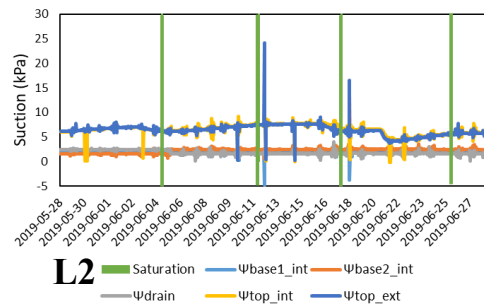
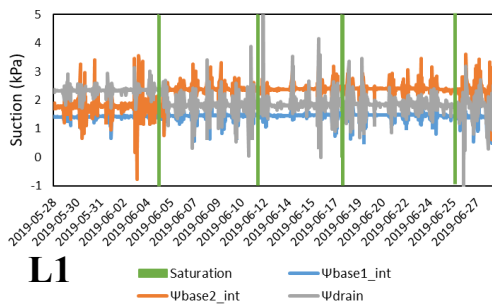
d'assurer que le système est bien désaéré et en cas de présence de bulles d'air de les aspirer. Les étapes de l'application du vide pendant 2 minutes et du remplissage avec la seringue sont exécutées en alternance à plusieurs reprises pour s'assurer qu'il n'y a plus de bulles d'air dans le système. Les résultats des valeurs des T4e obtenues pour la période d'analyse de ce mémoire sont présentés à la figure 86.



Figure 85 : Méthode de saturation des T4 à l'aide d'une seringue et de la pompe à vide

Également, la saturation s'est donc réalisée toutes les semaines, car les dates de saturations sont les suivantes et sont identifiées dans la figure 86.

- 05-06-2019
- 07-06-2019
- 12-06-2019
- 18-06-2019
- 26-06-2019



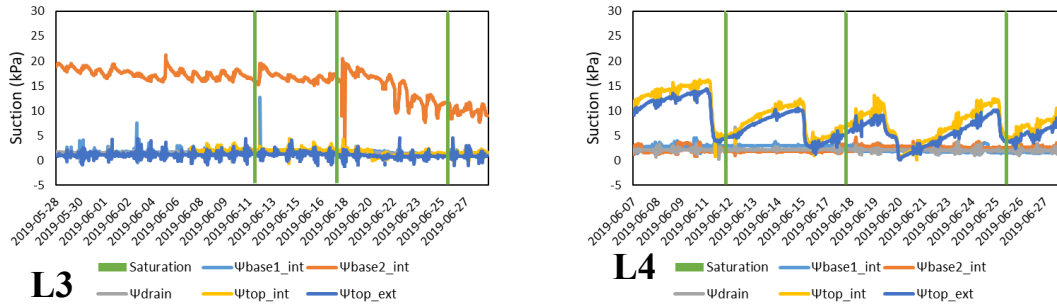


Figure 86 : Données de succion pour les 4 lysimètres pour 2019

Pour 2019, il n'y a pas de chute des valeurs pour les instruments lors de la saturation. De plus, l'ensemble des instruments fournissent des valeurs dans un même intervalle pour l'ensemble de la période et les courbes sont un comportement similaire. À l'exception de la sonde à la base du lysimètre soit à 350 mm pour le L3 qui présente des valeurs sont trop élevées. En effet, les valeurs devraient être dans le même ordre de grandeur que les autres sondes installées à la même hauteur dans les autres lysimètres. Une attention particulière sera portée à cet instrument au cours de l'été 2019 et les résultats présentés dans les prochains travaux faits par le groupe de recherche. En bref, l'évaluation de cette nouvelle méthode de saturation s'est poursuivie au cours de l'été 2019 et les résultats seront présentés ultérieurement.

8.4.2 Effet de la radiation solaire

Une variation importante des valeurs récupérées par les DL6 pour les T4e, instruments de succion, est présente durant la période d'ensoleillement qui est entre approximativement 6 : 00 et 20 : 00. La figure 87 présente un exemple des oscillations causées par la radiation solaire pour une période du 13-06-2019 au 17-06-2019 avec les données météorologiques pertinentes tirées de la station météorologique installée près des lysimètres. À noter que cette distorsion n'est pas causée par la chaleur parce que les températures sont constantes pour la période d'analyse. Par conséquent, l'hypothèse que la radiation solaire est responsable de ce bruitage dans la transmission du signal est émise. Effectivement, lors du 13 et du 15 juin 2019, la présence des oscillations est minimale et les valeurs de radiation solaire enregistrées sont de 212,9 et de 271,1 W/m², ce qui est plus faible que les valeurs des autres journées, 417,7 ; 460,6 ; 583,4 W/m² où la variation des oscillations est plus importante.

Pour les journées ayant le plus grand écart de radiation solaire de la période présentée à la figure 87, c'est-à-dire le 13-06-2019 et le 17-06-2019. La succion et la radiation pour 24 heures sont présentées à la figure 88. À noter que l'ensemble des ports de la boîte 1 sont présentés dans le cadre de cette analyse. À la figure 88a, les valeurs de radiation solaire sont faibles comparativement à celles obtenues à la figure 88b, donc il n'y a que très peu d'oscillations pour la journée du 13-06-2019, mais tel n'est pas le cas pour la journée du 17-06-2019, où les oscillations sont importantes entre 7 : 30 et 18 : 30.

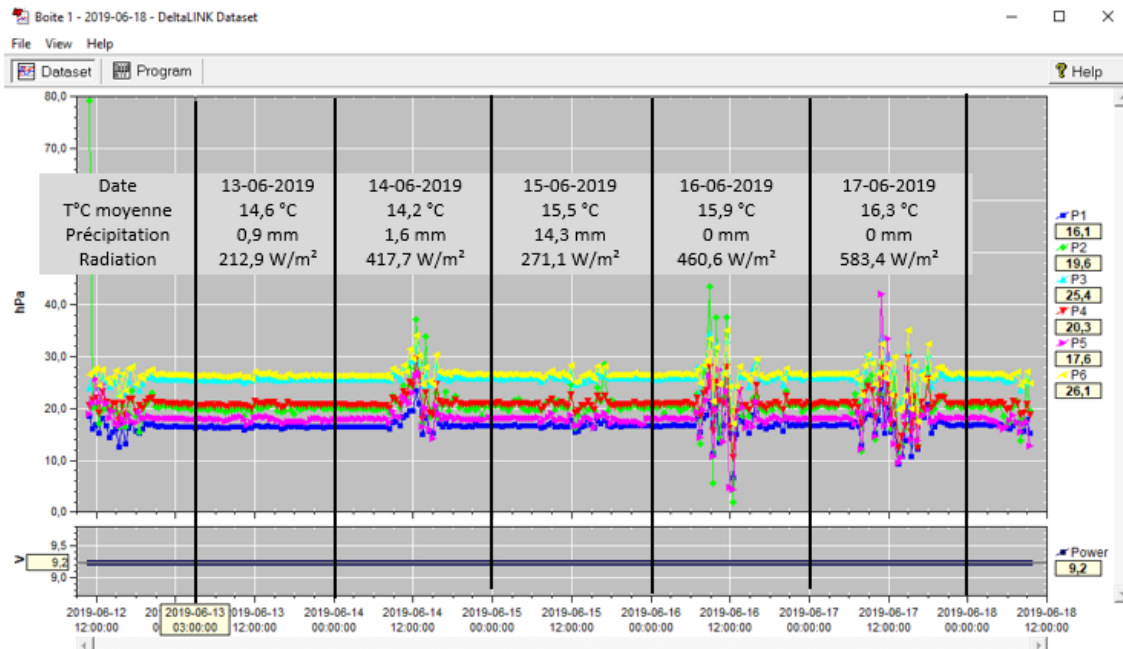


Figure 87 : Oscillations causées par la radiation solaire et données météorologiques

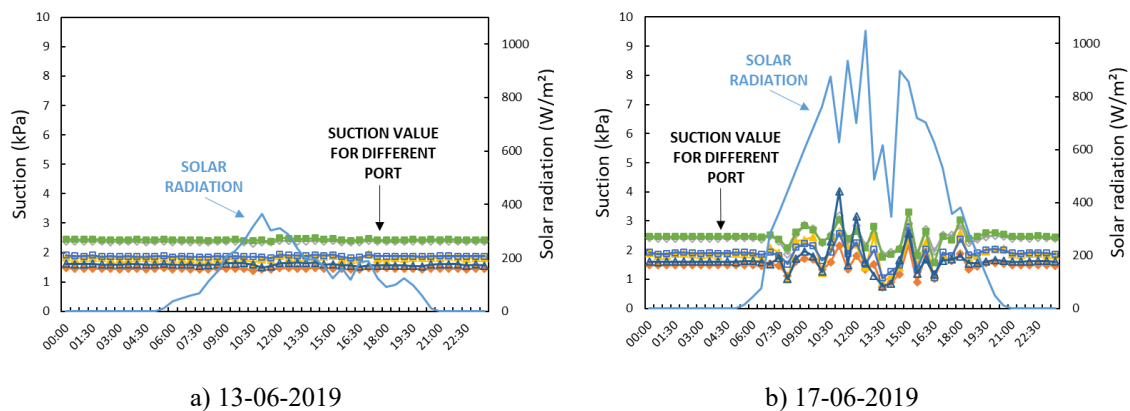


Figure 88 : Succion et radiation pour 24 heures pour deux journées ayant un écart important de radiation

Afin de remédier à ce problème, une première hypothèse est formulée : la radiation solaire sur la boîte de protection noire (voir figure 89), où est placé l'acquisiteur de données DL6, crée les oscillations dans les données.



Figure 89 : Boîte de protection des DL6

Au cours du printemps 2019, des panneaux de mousse de polystyrène ainsi qu'une pellicule réfléchissante ont été installés sur les boîtes protectrices des DL6 telles qu'illustrées à la figure 90. Le rôle de ces nouveaux éléments est de réfléchir le rayonnement solaire et de conserver la fraîcheur à l'intérieur de la boîte.



Figure 90 : Protections supplémentaires sur les boîtes de protection des DL6

Toutefois, malgré ces ajouts au niveau de la boîte de protection, le problème d'oscillation pendant le jour persiste (voir figure 91). L'intensité des oscillations est inchangée, il faudra alors étudier d'autres pistes de solution au cours des prochains mois. Par exemple, il est possible que les nouveaux éléments installés soient insuffisants pour contrer l'effet de la radiation solaire sur les DL6. Il faudrait peut-être enfouir les boîtes dans le sol. Le sol permettrait de conserver une température constante. Également, il faut examiner la possibilité que les oscillations soient peut-être causées par l'influence de la radiation solaire

sur les fils reliant les instruments et les acqui-seurs de données. Une solution pour explorer cette source est de recouvrir les fils au chantier d'un ruban adhésif de couleur pâle ou pellicule miroir ou de les enfouir.

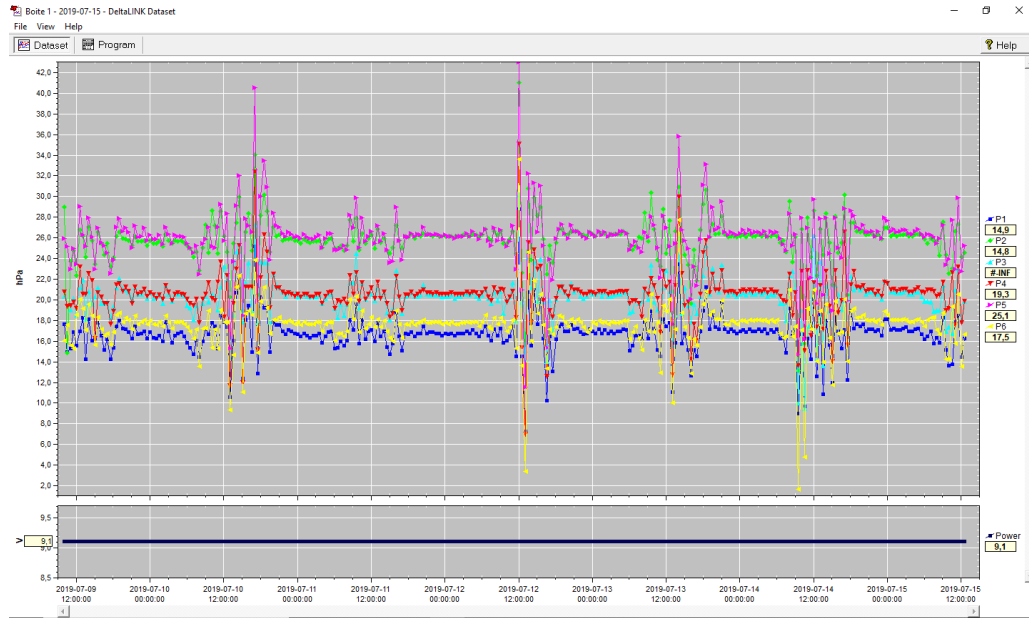


Figure 91 : Présence d'oscillation pendant le jour après l'ajout des protections

En ce qui concerne le traitement des données, en ce moment, les valeurs récupérées entre 6 : 00 et 20 : 00 sont systématiquement éliminées pour le calcul de la moyenne journalière. Cependant, cette méthode doit être peaufinée afin de considérer les événements, où la variation causée par des événements pluviométriques. Autrement dit, il faut développer un traitement qui permettrait d'éliminer le bruitage causé par l'effet de la radiation solaire, mais de conserver les variations de succion causées par l'eau qui percole dans le sol. Ces améliorations seront apportées lorsque la calibration des DL6 sera complétée afin de maximiser la manipulation du traitement de données.

8.5 RÉPONSES PRÉLIMINAIRES AUX BESOINS DU PARTENAIRE INDUSTRIEL

Les objectifs de ce projet de recherche sont d'étudier les infiltrations dans un recouvrement alternatif. Il faut alors répondre aux deux objectifs secondaires énoncés précédemment qui sont d'analyser les différentes configurations de sol (performance) et d'évaluer la possibilité d'utiliser des sols contaminés de catégorie BC. Les analyses du taux de percolation dans les lysimètres ainsi que le suivi chimique des eaux et des sols de surface sont traitées. **Il est important de rappeler que les résultats ne sont que pour la première année d'acquisition de données, donc il est impossible de tirer des conclusions définitives.** En bref, les analyses sont présentées uniquement à titre indicatif et les données des prochaines années permettront de répondre aux objectifs de ce projet de recherche.

8.5.1 Analyse du taux de percolation

Dans un premier temps, la figure 92 présente le taux de percolation pour tous les lysimètres pour la période d'analyse qui est du 29-06-2018 au 28-06-2019. Il faut rappeler que du 13-10-2018 au 24-10-2018, les instruments n'étaient pas installés au chantier à cause d'une erreur de communication lors des tâches à réaliser avant l'hiver. Aussi, il faut rappeler qu'il y avait un problème avec l'auget du L1 causé par un mauvais nivellement en 2019. Dans l'ensemble, les courbes possèdent un comportement similaire et réagissent lors des événements de pluie.

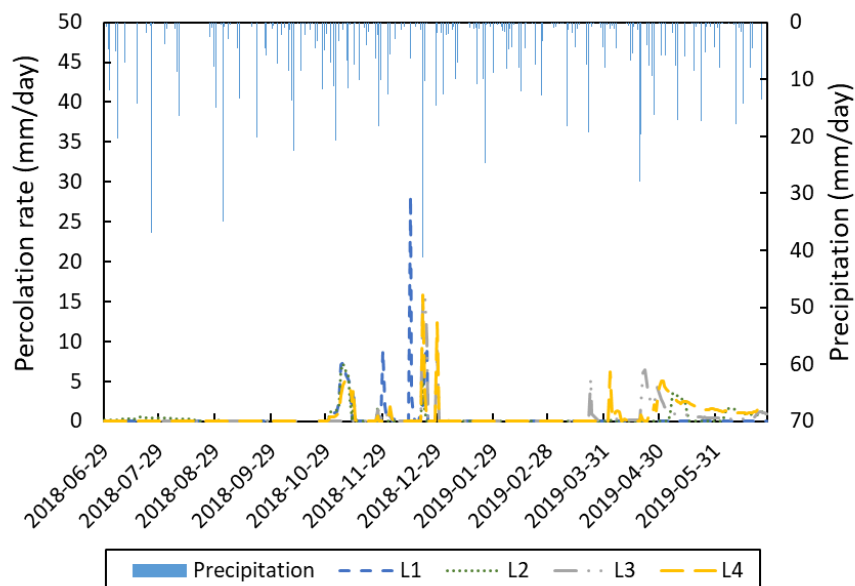


Figure 92 : Taux de percolation pour la période d'analyse du 29-06-2018 au 28-06-2019

Pour mieux interpréter ces résultats, deux périodes critiques ont été sélectionnées : l'automne (30-10-2018 au 07-01-2019) et le printemps (23-03-2019 au 28-06-2019). Les courbes sont présentées aux figure 93 et Figure 94. Pour ces deux périodes, il est possible de constater que la percolation se produit deux à trois jours après l'enregistrement du taux de précipitation.

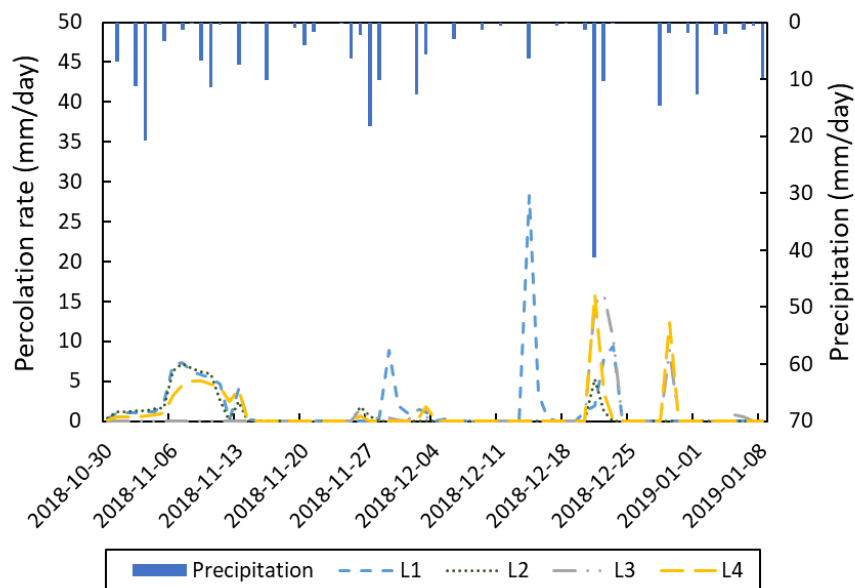


Figure 93 : Taux de percolation pour la période d'analyse à l'automne 2018

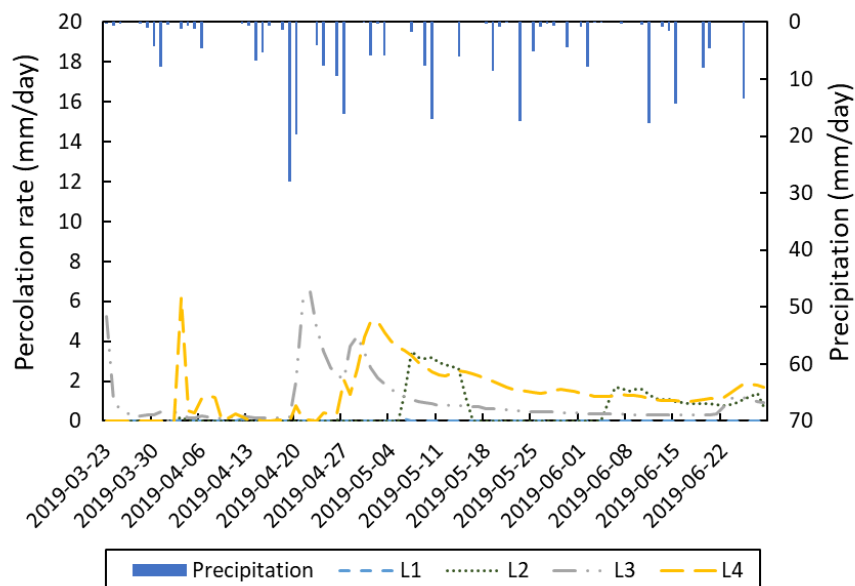


Figure 94 : Taux de percolation pour la période d'analyse au printemps 2019

Malgré le fait que les données pour la première année d'analyse soient incomplètes, le cumulatif des quantités mettent de comparer le taux de percolation des lysimètres entre eux tel que présenté à la figure 95. De ce fait, ces quantités **préliminaires** annuelles possèdent le même ordre de grandeur. Cependant, il est encore trop tôt pour ce projet de recherche d'affirmer qu'une configuration des sols est mieux qu'une autre afin de réduire les infiltrations dans le recouvrement d'un site d'enfouissement.

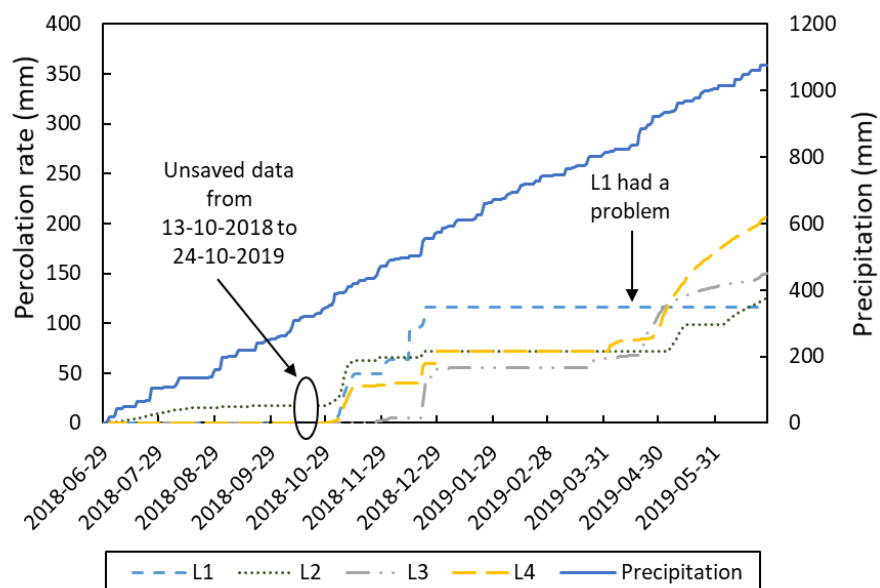


Figure 95 : Taux de percolation cumulatif pour la période d'analyse du 29-06-2018 au 28-06-2019

Également, la figure 95 permet d'éclaircir le doute qui excitait au niveau de l'écoulement du L2 qui avait été soulevé au cours de l'année 2018, car beaucoup d'eau était mesurée par le contenant avec auget basculeur. Tout d'abord, la quantité d'eau cumulative pour L2 est semblable aux autres. De plus, l'hypothèse qu'une fuite soit présente dans le tuyau de sortie a été infirmée à l'aide de l'auscultation par vidéo réalisée le 28-06-2019 (voir figure 96).



Figure 96 : Auscultation par vidéo du tuyau de sortie du L2

En somme, le tableau 10 présente le pourcentage du taux de percolation en fonction des précipitations annuelles. Selon l'article d'Abichou et *al.* [2012], les valeurs du taux de percolation pour un recouvrement évapotranspiration (ET) se situent entre 17 et 24 % du volume des précipitations. Les valeurs obtenues pour cette première année sont légèrement inférieures à celles évoquées dans la littérature. Cette différence est favorable, comme il y a moins d'eau qui s'infiltre dans le recouvrement, il y a une réduction de la production de lixiviat.

Tableau 10 : Pourcentage du taux de percolation en fonction des précipitations annuelles

L1	L2	L3	L4
11 %	12 %	14 %	19 %

8.5.2 Suivi chimique des eaux et sols

Un suivi chimique des eaux de ruissellement et des sols de surface est réalisé afin de répondre à un objectif de ce projet de recherche, soit celui d'évaluer la possibilité d'utiliser des sols contaminés de catégorie BC comme matériaux de construction sans que ces derniers ne puissent pas entraîner une contamination de surface significative. Autrement dit, cette approche permet de suivre une potentielle migration des contaminants vers la surface.

Les échantillons sont récupérés de mai à octobre, c'est-à-dire la période où le sol n'est pas gelé. La fréquence de récupération pour les eaux de ruissellement, c'est lorsqu'il y a suffisamment d'eau soit au moins 2 litres (quantité nécessaire pour remplir les bouteilles des différents paramètres) tandis que pour les sols, la fréquence est une fois par mois. L'eau de ruissellement est récupérée dans le baril connecté au drain de surface tel qu'illustré à la figure 97. En ce qui concerne les sols de surface, ils sont récupérés en aval de l'enclos près du drain de surface à trois endroits différents. De plus, il est important de rappeler que les lysimètres 1 et 2 sont construits dans le même enclos avec le même sol, c'est pourquoi qu'une seule analyse est faite.



Figure 97 : Baril pour récupérer les eaux de surface

Les Tableau 11 et Tableau 12 présentent la fréquence des prises d'échantillon respectivement pour 2018 et 2019. En résumé, au cours de l'année 2018, pour l'ensemble des lysimètres, 7 échantillons d'eau de ruissellement et 12 de sol ont été récupérés. À noter qu'aucun échantillon pour les eaux de ruissellement n'a été récupéré en 2018 pour le L4. Tandis qu'en 2019, jusqu'au 29-08-2019 (fin de la période d'analyse pour ce mémoire), 21 échantillons d'eau et 20 de sol ont été récupérés. De toute évidence, il est possible de

constater une augmentation du nombre d'échantillons d'eau entre les deux années, l'explication réside dans le fait que le premier drain pour capter les eaux de ruissellement construit en 2018 ne permettait pas de récupérer adéquatement l'eau de ruissellement, mais au cours de l'été 2018, des modifications ont été effectuées. Les détails de ce changement sont expliqués à la page 56 du rapport de construction transmis à Waste Management Inc. au mois de février 2019 (voir l'annexe C)

Tableau 11 : Fréquence des prises d'échantillon sur le terrain pour 2018

	Total d'échantillon	2018-08-20	2018-08-23	2018-08-30	2018-09-06	2018-09-13	2018-09-20	2018-09-27	2018-10-10	2018-10-12	2018-11-05
Eau de surface	5										
L1&L2 - Silt	4	-	-	-	X	X	-	X	X	-	-
L3 - BC	1	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-
L4 - AB	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sol	9										
L1&L2 - Silt	3	X	-	-	-	-	X	-	X	-	-
L3 - BC	3	X	-	-	-	-	X	-	X	-	-
L4 - AB	3	X	-	-	-	-	X	-	X	-	-

Tableau 12 : Fréquence des prises d'échantillon sur le terrain pour 2019

	Total d'échantillon	2019-04-03	2019-04-17	2019-04-24	2019-05-08	2019-06-05	2019-06-18	2019-06-26	2019-07-02	2019-07-09	2019-07-22	2019-08-08	2019-08-29
Eau de surface	20												
L1&L2 - Silt	5	-	-	X	-	-	-	X	X	X	X	-	-
L3 - BC	7	-	-	X	X	-	-	-	X	X	X	X	X
L4 - AB	8	X	X	X	-	-	-	X	X	X	X	X	-
Sol	15												
L1&L2 - Silt	5	-	-	-	X	X	X	-	X	-	-	-	X
L3 - BC	5	-	-	-	X	X	X	-	X	-	-	-	X
L4 - AB	5	-	-	-	X	X	X	-	X	-	-	-	X

Les analyses chimiques sont effectuées par un laboratoire indépendant et les certificats d'analyse officiels sont transmis à l'équipe. Pour les eaux, l'analyse des résultats est faite selon l'article 53 du règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (REIMR) qui régit les rejets de l'eau dans l'environnement [Gouvernement du Québec, 2018a]. Pour les sols contaminés, elle est basée sur les annexes du règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains (RPRT).

Les paramètres analysés de l'eau de ruissellement sont l'azote ammoniacal, les composés phénoliques, la demande biochimique en oxygène (DBO₅), les matières en suspension, le zinc et le pH. Selon les spécifications du partenaire industriel, les hydrocarbures pétroliers ont été ajoutés aux précédents. Aussi, il est important de noter que selon le guide d'intervention de la protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés, la mobilité des contaminants est influencée notamment par le pH du sol. Par conséquent, le

pH doit se situer dans un intervalle de 6 à 9,5, car, à l'extérieur de cet intervalle, la mobilité principalement celle des métaux est favorisée [MDDELCC, 2016].

Les valeurs limites des paramètres pour les eaux de ruissellement du REIMR sont présentées avec les résultats obtenus dans les Tableaux 13 à 15. Les valeurs qui sont supérieures aux valeurs limites sont identifiées en rouge. Pour la période d'analyse, les seuls paramètres qui excèdent les valeurs limites sont les matières en suspension (MES) et le zinc. Il est intéressant de remarquer que les valeurs supérieures se trouvent dans L1&L2, où aucun sol contaminé n'a été utilisé. Pour les MES, il est à noter que sur le site d'enfouissement l'eau de ruissellement est acheminée dans des étangs de sédimentation, ce n'est donc pas un problème. Également, les sédiments transportés par les eaux de ruissellement vont diminuer dans le temps parce que la végétation va pousser sur la surface des enclos. Pour le zinc, les deux valeurs supérieures à la valeur limite proviennent des échantillons qui ont été récupérés le 10-10-2018, il serait donc intéressant de porter une attention particulière au cours des prochains automnes afin de voir si ce phénomène est récurrent. En ce qui concerne les valeurs de pH, elles se situent entre 6,39 et 7,61, soit à l'intérieur de l'intervalle recommandé.

Tableau 13 : Résultats de la contamination des eaux de ruissellement pour L1&L2

Paramètres	Unité	REIMR Article 53 Valeurs limites	2018-09-06	2018-09-13	2018-09-27	2018-10-10	2019-04-24	2019-06-26	2019-07-02	2019-07-09	2019-07-22
Phénol	mg/L	0,085	<0,005	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,002	N/A	<0,002	0,0047
DBO5	mg O2/L	150	<3	<3	<3	<3	3	<4,0	<4,0	<5,3	<5,3
Azote ammoniacal	mg N/L	25	0,13	0,2	<0,07	<0,07	0,26	<0,020	0,042	0,034	0,29
pH	-	supérieur à 6, mais inférieur à 9,5	7,14	7,47	7,01	7,61	7,38	6,82	6,62	6,87	7,25
MES / MVES	mg/L	90	650	30	27	1400	8	8	8	150	120
Zinc	mg/L	0,17	0,105	<0,01	<0,05	0,185	0,025	0,012	0,01	0,024	0,075
RPRT Critère A											
Hydrocarbures pétrol. C10-C50	mg/L	300	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	5,5	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Tableau 14 : Résultats de la contamination des eaux de ruissellement pour L3

Paramètres	Unité	REIMR Article 53 Valeurs limites	2018-10-10	2019-04-24	2019-05-08	2019-07-02	2019-07-09	2019-07-22	2019-08-08	2019-08-29
Phénol	mg/L	0,085	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,002	0,0046	0,0074	0,0057
DBO5	mg O2/L	150	6	1	3	<4,0	<5,3	5,7	<5,3	<5,3
Azote ammoniacal	mg N/L	25	<0,07	<0,07	<0,07	<0,020	<0,040	0,15	0,12	0,38
pH	-	supérieur à 6, mais inférieur à 9,5	7,1	7,94	6,61	6,74	6,58	6,76	6,8	7,13
MES / MVES	mg/L	90	368	6	27	12	12	29	89	12
Zinc	mg/L	0,17	0,214	<0,02	<0,04	0,0086	0,016	0,033	0,017	0,023
RPRT Critère A										
Hydrocarbures pétrol. C10-C50	mg/L	300	3,8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Tableau 15 : Résultats de la contamination des eaux de ruissellement pour L4

Paramètres	Unité	REIMR Article 53 Valeurs limites	2019-04-03	2019-04-17	2019-04-24	2019-06-26	2019-07-02	2019-07-09	2019-07-22	2019-08-08
Phénol	mg/L	0,085	<0.02	<0.02	<0.02	<0,002	<0,002	<0,002	0,0035	0,0094
DBO5	mg O2/L	150	6	<3	14	<4,0	<5,3	<5,3	<4,0	<5,3
Azote ammoniacal	mg N/L	25	<0.07	0,21	<0.07	0,03	0,02	0,024	0,14	0,47
pH	-	supérieur à 6, mais inférieur à 9,5	7,24	7,78	7,41	6,6	6,78	6,74	6,75	6,39
MES / MVES	mg/L	90	10	<1	159	2	180	230	220	90
Zinc	mg/L	0,17	0,034	<0.02	0,031	0,023	0,041	0,046	0,029	0,019
		RPRT Critère A								
Hydrocarbures pétrol. C10-C50	mg/L	300	<0.1	<0.1	N/A	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Les valeurs limites des paramètres déterminées par le guide d'intervention pour le critère A (teneur de fond pour les Basse-Terre du Saint-Laurent), par le RPRT pour les critères B et C et par le règlement de l'enfouissement des sols contaminés (RESC) pour les valeurs limites de l'annexe I sont présentés avec les résultats obtenus dans les Tableau 19, à 21. Tous les résultats des métaux, des hydrocarbures aromatiques polycycliques et les hydrocarbures pétroliers obtenus sont inférieurs aux valeurs limites du critère A.

En somme, le suivi chimique des eaux de ruissellement et des sols de surface doit continuer pour bien répondre au besoin du partenaire industriel.

9 CONCLUSION

La conclusion permet de faire un sommaire des éléments importants présentés tout au long de ce mémoire de maîtrise. Également, elle fait un retour sur les contributions originales annoncées dans l'introduction et confirme qu'elles sont réalisées. Puis, elle rappelle les travaux qui pourront être réalisés par le groupe de recherche dans le futur.

9.1 Sommaire

Ce mémoire présente l'ensemble des tâches accomplies pour atteindre les sept objectifs de ce travail de maîtrise. En effet, les résultats permettent d'affirmer que la question de recherche directement liée à ce travail de maîtrise est répondue. Sans nul doute, l'exécution des différentes étapes au niveau de la conception, des essais de détermination des propriétés des sols a été réussie. Le plan expérimental possède des instruments qui permettent de fournir des informations relatives à son comportement. Puis, le fonctionnement des différentes composantes a été évalué en assurant la gestion efficace des données récupérées, en effectuant la remise en état du site après l'hiver et en analysant/traitant les données obtenues pour la première année d'acquisition. Inévitablement, les comparaisons des valeurs obtenues par les sondes de teneur en eau et de succion avec celles du taux de percolation et de précipitation journalier exposent la réalité présente sur le terrain.

En ce qui concerne la réponse liée à ce projet de recherche, elle est répondue partiellement, car, à ce moment dans le projet, il est impossible d'émettre des conclusions finales. À noter qu'une section traite des réponses préliminaires aux besoins du partenaire industriel. Elle aborde les analyses du taux de percolation dans les lysimètres ainsi que les résultats du suivi chimique des eaux et des sols de surface. Actuellement, le taux de percolation cumulatif pour les 4 lysimètres analysés fournit des quantités totales se situant dans le même ordre de grandeur. Également, en ce qui concerne les résultats obtenus pour les analyses chimiques de l'eau, des valeurs supérieures aux limites permises par le REIMR ont été enregistrées pour les matières en suspension et le zinc, et ce même dans l'enclos de L1 et L2, où aucun sol contaminé n'a été mis en place. Au niveau des analyses des sols, aucun écart n'a été enregistré. Il est important de rappeler que ces informations sont une

première réponse, mais qu'il ne s'agit pas d'une réponse définitive, car il faudra obtenir plus de résultats avant d'émettre des conclusions.

En ce qui concerne les hypothèses, il est encore trop tôt dans le calendrier de ce projet de recherche pour répondre à ses affirmations. Au niveau des lysimètres, le plan expérimental s'est calibré au cours de cette première année d'analyse. Il est alors impossible de savoir si le lysimètre est l'outil le plus adéquat et que la méthode développée par Parent et *al.* [Parent et *al.*, 2006] est la meilleure. Toutefois, sans nul doute, les sondes de teneur en eau et les tensiomètres (mesure de succion) permettent de fournir de nombreuses informations qui permettent de documenter le comportement des lysimètres. Puis, au niveau de l'utilisation des sols contaminés dans le recouvrement, les paramètres **actuels** relevés montrent qu'il n'y a aucune contamination de surface pour les eaux de ruissellement et les sols de surface.

9.2 Retour sur les contributions originales

Cette sous-section fait un retour sur les contributions originales annoncées dans l'introduction. Comme mentionné précédemment, ce projet de maîtrise s'imbrique dans un projet recherche ayant une plus grande portée. Par conséquent, les tâches accomplies sont une fraction de l'ensemble de celles relatives à ce grand projet. En d'autres termes, les activités réalisées sont des actions qui sont initiales et essentielles pour s'assurer de la bonne continuité du projet.

D'une part, la conception, la construction et le suivi du fonctionnement du plan expérimental permettent de contribuer à la création de documentation liée aux infiltrations dans le recouvrement des sites d'enfouissement du Québec. En effet, malgré le fait que les données recueillies sont préliminaires, il est possible d'étudier la quantité d'eau percolée dans le recouvrement du site d'enfouissement de Waste Management Inc. situé à St-Nicéphore.

D'une autre part, à l'heure actuelle, le suivi chimique des eaux et des sols n'a révélé aucun écart significatif par rapport aux valeurs limites fournies par les règlements émis par le Gouvernement du Québec. De ce fait, il n'y aurait pas de potentielle migration des contaminants vers la surface. À savoir que plus d'études devront être faites pour effectuer

une future modification de la réglementation. Toutefois, il s'agit d'une réponse qui permet de continuer à examiner cette possibilité qui permettrait de modifier les conditions de drainage du recouvrement d'un site d'enfouissement à faible coût.

9.3 Travaux futurs

Les travaux futurs concernent tous les éléments qui devront être réalisés dans les prochaines semaines et mois pour s'assurer du bon fonctionnement du plan expérimental et l'analyse adéquate des résultats. À savoir qu'il s'agit d'un rappel des éléments mentionnés précédemment dans le texte.

- a) Au niveau de la courbe de rétention pour le sol contaminé de catégorie BC, il serait pertinent de faire une correction selon le pourcentage de gravier contenu dans le sol selon la méthode proposée par Khaleel et Relyea [1997].
- b) La modélisation de la vérification du concept n'a pas pu être complétée à cause des problèmes d'écoulement d'eau et de teneur en eau initiales. Il est alors essentiel de répéter ces essais numériques en ajustant le modèle pour que ce dernier fournisse des réponses concluantes.
- c) Il faut rappeler que les courbes de rétention d'eau et les fonctions de conductivité hydraulique sont préliminaires comme la calibration des DL6 est non complète. De plus, il faudrait alors effectuer une correction par rapport à l'effet de la radiation solaire. Au cours des prochains mois, ces graphiques devraient être actualisés.
- d) Comme l'ajout du drain à la base du pourtour des lysimètres peut modifier les principes de la méthode utilisée pour la détermination de la hauteur des parois des lysimètres, il faudrait alors étudier le rôle de ce drain à l'aide des modèles numériques.
- e) Il faudrait vérifier si la nouvelle technique de saturation utilisant la pompe à vide est plus efficace que celle sans. Pour se faire, il faudrait regarder la cohérence des courbes de succion des instruments installés à la bouche du lysimètre, car ce sont ces instruments qui sont les plus sensibles.
- f) Les lectures de température obtenues par les sondes de 5TM pourraient fournir des informations supplémentaires aux analyses et permettre l'analyse de la pénétration

du gel dans les sites d'enfouissement. Un travail explorant cet aspect pourrait être réalisé.

- g) Comme le problème de l'oscillation au niveau de la boîte du DL6 n'est pas réglé, il faudrait continuer à réfléchir à ce problème en essayant de traiter les éléments séparément. Autrement dit, en vérifiant si le problème est au niveau des fils en utilisant le lecteur portatif Infield ou au niveau de la boîte elle-même. Également, comme aucune information n'est présente dans le manuel d'utilisation, il serait intéressant de partager cette situation avec le producteur, Meter.
- h) Lorsque plus de données seront disponibles pour les sondes de succion installées au fond, il serait possible d'effectuer la comparaison avec les valeurs du taux de percolation pour l'ensemble des lysimètres.
- i) Sur le terrain, il faudrait installer plus de sondes de teneur en eau et de succion dans L3 et L4 pour être en mesure de reconstituer les courbes de rétention d'eau des sols contaminés de catégorie AB et BC. Ces courbes sont importantes pour connaître le comportement *in situ* réel de ces sols non saturés.
- j) Il faudrait continuer à fournir fréquemment des réponses au partenaire concernant les analyses du taux de percolation dans les lysimètres ainsi que le suivi chimique des eaux de ruissellement et des sols de surface. Ces analyses permettront de répondre aux deux objectifs secondaires qui sont d'analyser les différentes configurations de sol (performance) et d'évaluer la possibilité d'utiliser des sols contaminés de catégorie BC.

10 LISTE DES RÉFÉRENCES

- Abdolahzadeh, A. M., Lacroix Vachon, B., & Cabral, A. R. (2011). Evaluation of the effectiveness of a cover with capillary barrier effect to control percolation into a waste disposal facility. *Canadian Geotechnical Journal*, volume 48, numéro 7, p. 996-1009.
- Abichou, Tarek, Jubily Musagasa, Lei Yuan, Jeff Chanton, Kamal Tawfiq, Donald Rockwood, and Louis Licht. (2012). Field Performance of Alternative Landfill Covers Vegetated with Cottonwood and Eucalyptus Trees. *International Journal of Phytoremediation* 14, p.47–60.
- Albright, W. H., Benson, C. H., Gee, G. W., Abichou, T., McDonald, E. V., Tyler, S. W., & Rock, S. A. (2006). Field performance of a compacted clay landfill final cover at a humid site. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, volume 132, numéro 11, p.1393-1403.
- Arya, L.M., et Paris, J.,F. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, volume 45, p. 1023-1030.
- Benson, C, Abichou, T, Albright,W.,Gee,G. et Roesler,A. (2001). Field Evaluation of Alternative Earthen Final Covers. *International Journal of Phytoremediation*, volume 3, numéro 1, p. 1-8.
- Benson, C. H., Bosscher, P. J., Lane, D. T., & Pliska, R. J. (1994). Monitoring system for hydrologic evaluation of landfill covers. *Geotechnical Testing Journal*, volume 17, numéro 2, p. 138-149.
- Bew, B.E et Barbour, S.L. (1999). Lysimeter design in theory and practice. *International conference; 6th, Tailings and mine waste*. Saskatchewan, Canada, p. 13-22.
- Bews, B.E., O’Kane, M., Wilson, G.W. et Williams,D. (1997). The design of a low flux cover system, including lysimeters, for acid generating waste rock in semi-arid environments. *Proceedings of the Fourth International Conference on Acid Mine Drainage*, Volume 2.
- Brooks, R. H., & Corey, A. T. (1964). Hydraulic properties of porous media and their relation to drainage design. *Transactions of the ASAE*, volume 7 numéro 1, p. 26-28.
- Bureau de normalisation du Québec (BNQ). (2005). Sols : détermination de la masse volumique du sol en place selon la méthode du cône de sable, p. 8.

- Bureau de normalisation du Québec (BNQ). (2013). Sols : détermination de la relation teneur en eau-masse volumique sèche est obtenue à l'aide d'un essai avec énergie de compactage normale ($600 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$), p. 17.
- Bureau de normalisation du Québec (BNQ). (2014a). Sols : Analyse granulométrique des sols inorganiques, p. 27.
- Bureau de normalisation du Québec (BNQ). (2014b). Sols : détermination de la densité des particules solides, p. 8.
- Cabral, A. Simard, V. et Duarte. M. (2019). Design, construction and monitoring of large scale lysimeters to assess seepage through experimental fin cover designs. 17TH International Waste Management and landfill symposium, Italie, p. 8.
- Cronshey, R., (1986). Urban hydrology for small watersheds. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division. Technical Release 55, p. 101.
- Darcy, H. P. G. (1856). Les Fontaines publiques de la ville de Dijon. Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau, etc. V. Dalamont.
- Davis. (2019). VANTAGE PRO2. <https://www.davisinstruments.com/solution/vantage-pro2/>
- Decagon Devices. (2005). Mini disk infiltrometer: User's manuals, version 1:3. Decagon Devices Inc, p. 20.
- El hassni, Abdessamad. (2016). Perturbateurs endocriniens dans une station de traitement biologique de lixiviat d'un site d'enfouissement sanitaire : Cas du bisphénol-A. Mémoire de maîtrise. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, p. 91
- Fredlund, D. et Xing A. (1994). Equation for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, volume 31, numéro 3, p. 521-532.
- Fredlund, M., Wilson, G. et Fredlund, D. (2002) use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve. Canadien Geotechnical Journal, volume 39, numréo 5, p. 1103 -1117.
- Fredlund, M.D., Fredlund, D.G. et Wilson, G.W. (2000). An equation to represent grain-size distribution. Canadian Geotechnical Journal, volume 37, p. 817-827.
- GIA (2016). Analyse granulométrique par sédimentation. <http://www.gia-ing.eu/etude-sondage-geotechnique/olympus-digital-camera-11/> (page consulté le 13 septembre 2019).
- Gouvernement du Canada. (2019). Sources et puits de gaz à effet de serre : sommaire 2019. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement->

climatique/services/changements-climatiques/emissions-gaz-effet-serre/sources-puits-sommaire-2019.html (page consulté le 9 juin 2019).

Gouvernement du Québec. (2018a). Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%2019/> (page consultée le 7 octobre 2018).

Gouvernement du Québec. (2018b). Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%2037> (page consultée le 7 octobre 2018).

Gouvernement du Québec. (2018c). Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%2018/> (page consultée le 7 octobre 2018).

Gras, J.P., (2013). Approche micromécanique de la capillarité dans les milieux granulaires: rétention d'eau et comportement mécanique. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00821687/file/These-Gras2011.pdf> (page consultée le 29 juin 2019)

Grossmann, J., & Udluft, P. (1991). The extraction of soil water by the suction-cup method: a review. *Journal of soil science*, volume 42, numéro 1, p. 83-93.

Hoang, N.L. (2017). Études des propriétés hydromécaniques d'un sable limoneux : de la saturation partielle à la saturation complète. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01625084/document> (page consultée le 8 juin 2019).

Holtz, R. D. et Kovacs, W. D. (1991). Introduction à la géotechnique. Éditions de l'École polytechnique.

Hoskin. (2019). Tipping counter. https://www.hoskin.ca/catalog/index.php?main_page=product_info&products_id=1874

Huang, S, Barbour, S L Fredlund D G. (1998). Development and verification of a coefficient of permeability function for a deformable unsaturated soil. *Canadian Geotechnical Journal*, volume 35, p. 411-425.

Hydrus. (2011). User manual version 2
https://www.pc-progress.com/downloads/Pgm_Hydrus3D2/HYDRUS3D%20User%20Manual.pdf

Khaleel, R., & Relyea, J. F. (1997). Correcting laboratory-measured moisture retention data for gravels. *Water resources research*, volume 33, numéro 8, p. 1875-1878.

- Khire, M. V., Benson, C. H., & Bosscher, P. J. (1997). Water balance modeling of earthen final covers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 123, numéro 8, p. 744-754.
- Khire, M. V., Benson, C. H., & Bosscher, P. J. (2000). Capillary barriers: Design variables and water balance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, volume 126, numéro 8, p. 695-708.
- Kirkham, M. B. (2014). *Principles of Soil and Plant Water Relations*. Academic Press.
- Klute, A. et Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods, *American Society of Agronomy, Madison*, 687-734.
- Kohnke, H. et Dreirelbeis, F.R. (1940). A survey and discussion of lysimeters and a bibliography on their construction and performance. *United States Department of agriculture*, numéro 372, p. 1-30.
- Le Courrier Sud. (2018). Implantation d'un important site d'enfouissement de sols contaminés. <https://www.lecourriersud.com/sols-contamines-enfouis-a-becancour/> (page consultée le 4 octobre 2018).
- McCartney, J.S. et Zornberg, J.G. (2004). Use of moisture profiles and lysimetry to assess evapotranspirative cover performance. *5th international PhD symposium in Civil engineering*, p. 961-969.
- McCord, J. T., & Stephens, D. B. (1987). Lateral moisture flow beneath a sandy hillslope without an apparent impeding layer. *Hydrological Processes*, volume 1, numéro 3, p. 225-238.
- MDDELCC. (2016). Guide d'intervention relatif à la protection des sols et la réhabilitation des terrains contaminés. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/guide-intervention/> (page consultée le 8 octobre 2018).
- MDDELCC. (2017). Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés et plan d'action 2017-2020. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/politique.pdf> (page consultée le 7 octobre 2018).
- Meter Group AG. (2011). User manuel T4/T4e, p. 44
- Meter Group AG. (2015). Operation manual Hyprop, p. 97
- Meter Group AG. (2017.) Operation manual Ksat, p. 42
- Meter Group AG. (2019). Operation manual 5TM, P.19

- Mijares, R. G., & Khire, M. V. (2012). Field Data and Numerical Modeling of Water Balance of Lysimeter versus Actual Earthen Cap. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, volume 138, numéro 8, p. 889–897.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, volume 12, numéro 3, p. 513-522.
- Musy, A., & Soutter, M. (1991). *Physique du sol* (Vol. 6). PPUR presses polytechniques.
- Ngnepieba, P., Le Dimet, F. X., Boukong, A., & Nguetseng, G. (2002). Identification de paramètres: une application à l'équation de Richards. *ARIMA*, volume 1, p.127-157.
- Olivier, F. (2005). Guide méthodologique pour le suivi des tassements des Centres de Stockage de Classe II (Déchets ménagers et assimilés). https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/25168_guide_tassements.pdf (page consultée le 8 juin 2019).
- Parent, S.E. (2003). Étude des couvertures avec effet de barrière capillaire: Applications à l'utilisation des résidus de désencrage comme matériau de recouvrement de sites de résidus miniers et d'enfouissement sanitaire. Mémoire de maîtrise. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Québec.
- Parent, S.E. et Cabral, A. (2006). Design of inclined covers with capillary barrier effect, *Geotechnical and Geological Engineering Journal*, volume 24, p. 689-71.
- Parent, S.-É., Cabral, A., Gras, G et Marinho, F. (2006). Design and Installation of Zero-Tension Lysimeters in an inclined cover. *Fourth International Conference on Unsaturated Soils*, p. 1-9.
- Penman, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*. p. 120–14
- Pipatti, Riitta & A. Bhide, S & A. Brown, Keith & Steczko, Katarzyna & Mauschitz, Gerd & Krueger, Dina & Martinsen, Thomas. (2019). CH₄ emissions from solid waste disposal. https://www.researchgate.net/publication/240637841_CH4_EMISSIONS_FROM_SOLID_WASTE_DISPOSAL (page consulté le 8 juin 2019).
- RECYC-QUÉBEC. (2015). Bilan 2015 de la gestion des matières résiduelles au Québec. Québec, Canada, p. 33
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, volume 1, numéro 5, p. 318-333.
- Ross, B. (1990). The diversion capacity of capillary barriers. *Water Resources Research*, volume 26, numéro 10, p. 2625-2629.

- Simunek, J., van GENUCHTEN, M. Th. et SEJNA, M. (2011). The HYDRUS software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, user manual. PC Progress, Prague, République Czech.
- Smith, K.A. et Mullins, C.E. (2001). Soil and environmental analysis : Physical methods. Marcel Dekker Seconde Edition, New York.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. et Mesri, G. (1967). Soil mechanics in engineering practice. New York.
- Université de Sherbrooke (Octobre 2018). GCI733 — Géotechnique environnementale. <https://www.usherbrooke.ca/admission/fiches-cours/GCI733/>. (page consultée le 4 octobre 2018)
- USDA (2019). Sol texture Calculator. https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054167 (page consultée le 14 septembre 2019).
- van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, volume 44, p. 892-898.
- Wang, X., & Benson, C. H. (2004). Leak-free pressure plate extractor for measuring the soil water characteristic curve. Geotechnical Testing Journal, volume 27, numéro 2, p. 163-172.
- Wendroth, O., Ehlers, W., Kage, H., Hopmans, J. W., Halbertsma, J., & Wösten, J. H. M. (1993). Reevaluation of the evaporation method for determining hydraulic functions in unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, volume 57, numéro 6, 1436-1443.
- Wind, G.P. (1966): Capillary conductivity data estimated by a simple method. p.181–191.
- Youtube. (2017). Analyse de la granulométrie. <https://www.youtube.com/watch?v=DiDB5MD9RKI>
- Zhu, Y., Fox, R. H., & Toth, J. D. (2002). Leachate collection efficiency of zero-tension pan and passive capillary fiberglass wick lysimeters. Soil Science Society of America Journal, volume 66, numéro 1, p. 37-43.
- Zornberg, J. G., & McCartney, J. S. (2007). Evapotranspirative cover systems for waste containment. The handbook of groundwater engineering, 34-1.

ANNEXE

A. RÉSULTATS GLOBAUX POUR CHAQUE LYSIMÈTRE

Tableau 16 : Périodes de non-enregistrement pour les EM50

Lysimètres	Boîte	Port 1		Port 2		Port 3		Port 4		Port 5		Commentaires
		Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	
L1	LC3_TNC1	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	Erreur de communication pour la préparation du terrain. Déconnexion due au poids de la neige
L2	FC1_EC2	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	Erreur de communication pour la préparation du terrain. Déconnexion due au poids de la neige
		2018-11-29	2019-01-10	-	-	2018-11-28	2019-01-10	-	-	-	-	Déconnexion due au poids de la neige
		2019-01-25	2019-04-17	2019-01-23	2019-04-17	2019-01-25	2019-04-17	2019-01-24	2019-04-17	2019-01-11	2019-04-17	Déconnexion due au poids de la neige
L3	LC2_EC1	-	-	-	-	-	-	2019-06-03	2019-06-06	-	-	Problème de connexion
		-	-	-	-	-	-	2018-08-30	2019-04-17	2018-08-30	2019-04-17	Déconnexion due au poids de la neige
		2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	Erreur de communication pour la préparation du terrain.
L4	EM41551	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	Erreur de communication pour la préparation du terrain.
		-	-	-	-	-	-	2019-06-12	2019-06-17	-	-	Problème de connexion
		2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	Erreur de communication pour la préparation du terrain. Déconnexion due au poids de la neige

Tableau 17 : Date de début et de fin d'acquisition des données pour les DL6

Lysimètre	Boîte	Début au printemps 2018	Arrêt à l'automne 2018	Début au printemps 2019
L1	DL6 - 01	2018-06-27	2018-09-27	2019-05-28
L2	DL6 - 01	2018-06-27	2018-09-27	2019-05-28
	DL6 - 02	2018-06-27	2018-09-27	2019-05-28
L3	DL6 - 02	2018-06-27	2018-09-27	2019-05-28
	DL6 - 03	2018-06-27	2018-09-27	2019-06-07
L4	DL6 - 03	2018-06-27	2018-09-27	2019-06-07

Tableau 18 : Détails des périodes de non-enregistrement pour les Hobos

Lysimètre	Début au printemps 2018	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin
L1	2018-06-13	2018-10-11	2018-10-29	-	-	2019-05-16	2019-06-05
L2	2018-06-13	2018-10-11	2018-10-29	2018-08-21	2018-08-28	2019-05-16	2019-06-05
L3	2018-06-13	2018-10-11	2018-10-29	-	-	-	-
L4	2018-06-13	2018-10-11	2018-10-29	-	-	-	-

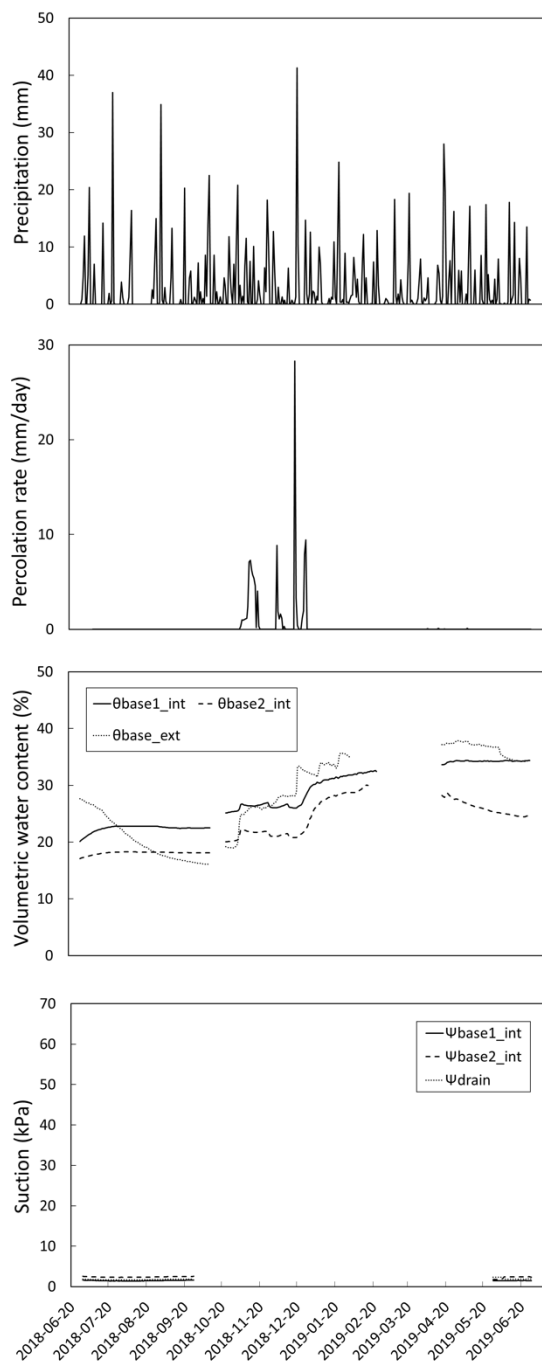


Figure 98 : Données du taux de précipitation, taux de percolation, teneur en eau et succion — L1

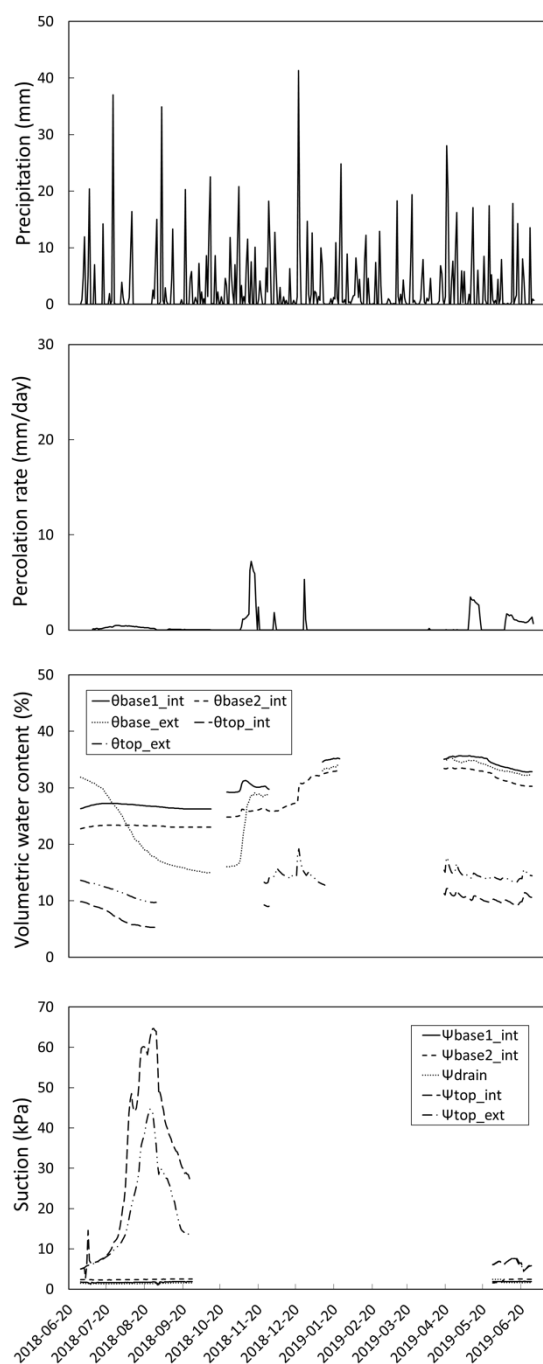


Figure 99 : Données du taux de précipitation, taux de percolation, teneur en eau et succion — L2

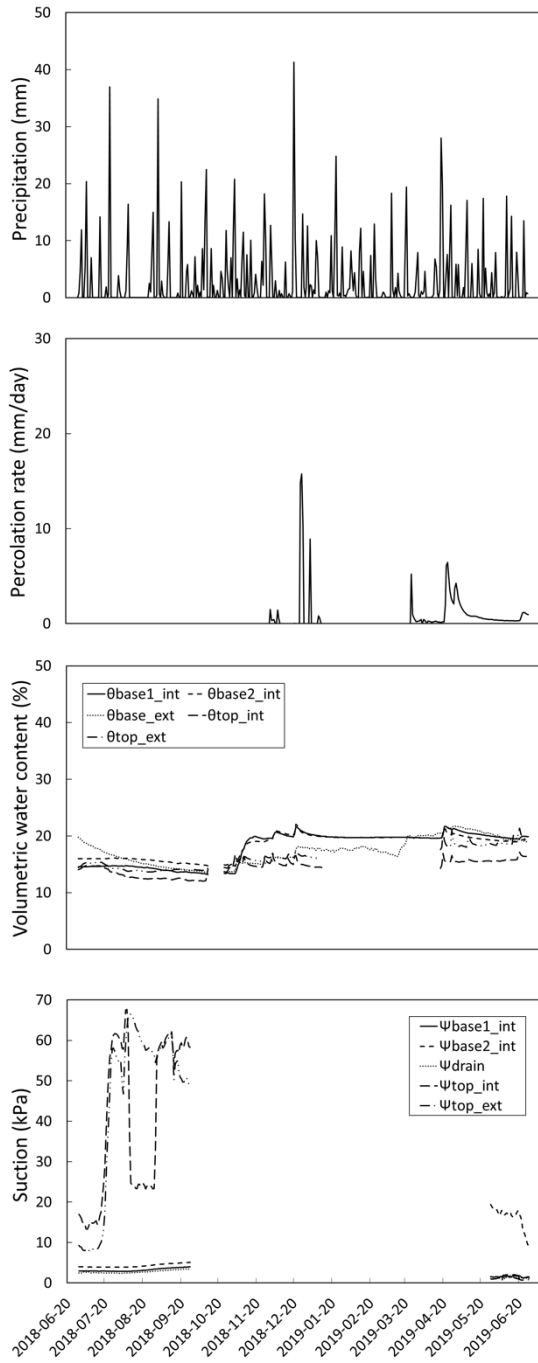


Figure 100 : Données du taux de précipitation, taux de percolation, teneur en eau et suction — L3

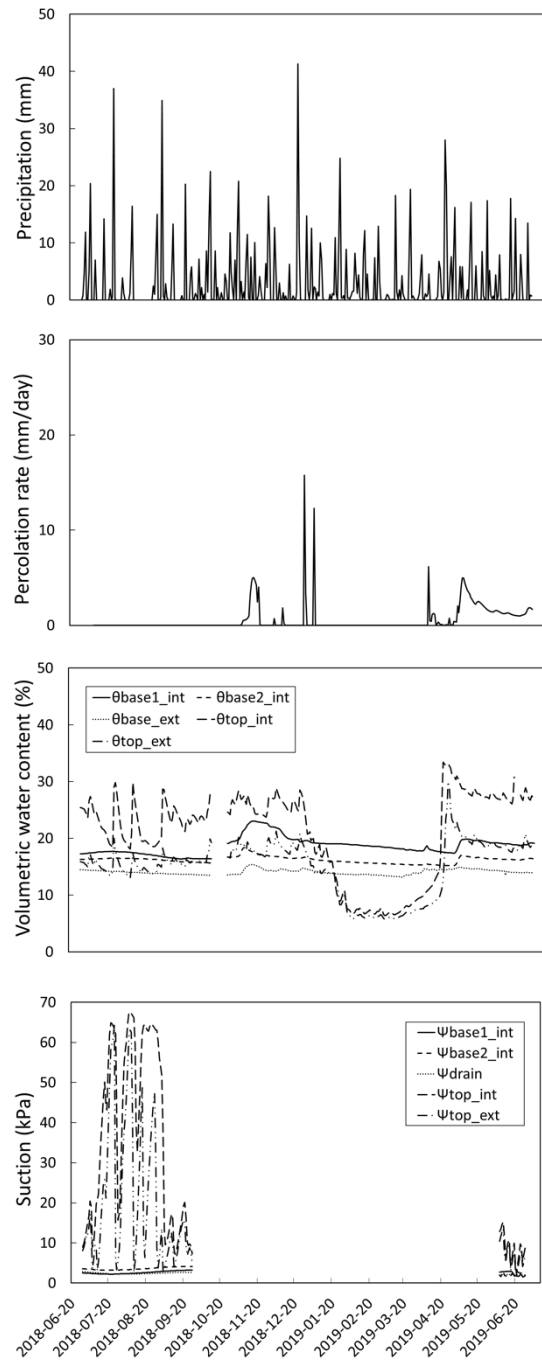


Figure 101 : Données du taux de précipitation, taux de percolation, teneur en eau et suction — L4

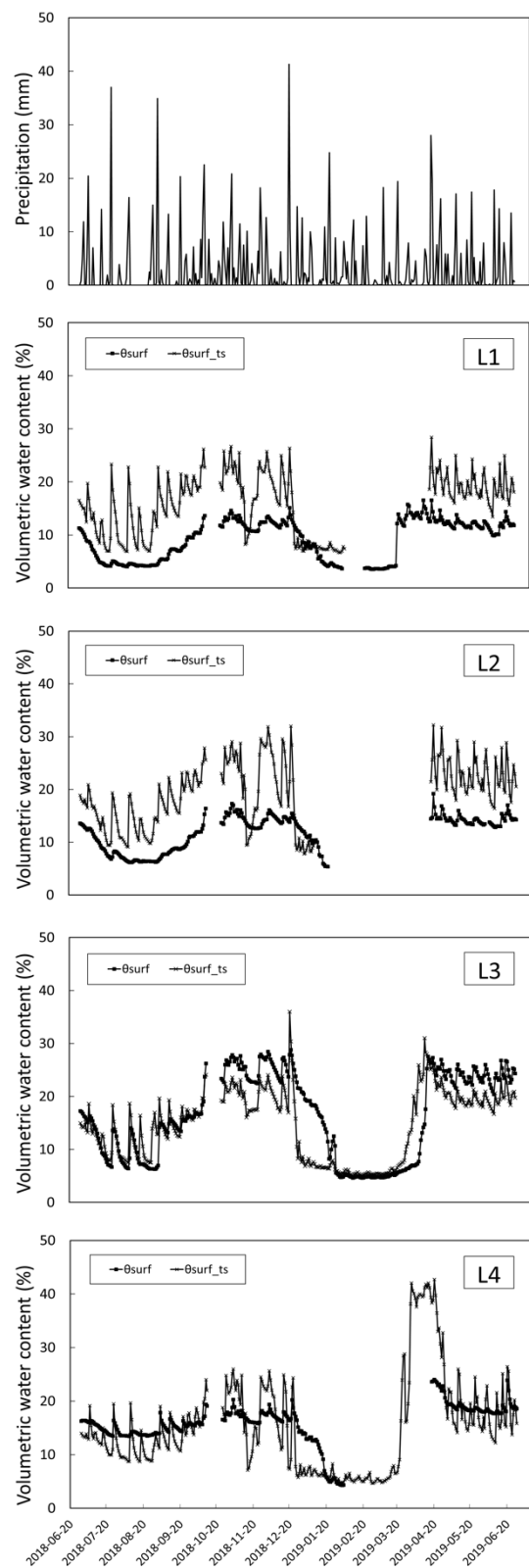


Figure 102 : Données de teneur en eau pour les sondes à la surface pour tous les lysimètres

B. SUIVI CHIMIQUE DES EAUX ET SOLS

Tableau 19 : Résultats de la contamination des sols pour L1&L2

Paramètres	Valeurs limites ou Concentration maximale acceptable				Concentration en mg/kg poids sec					
					L1&L2	L1&L2	L1	L2	L1&L2	L1&L2
	Critère A	Critère B / Annexe I du RPRT	Critère C / Annexe II du RPRT	Annexe I du RESC	2018-08-20	2018-09-20	2018-10-10	2018-10-10	2019-05-08	2019-06-05
MÉTAUX (et métalloïdes)										
Argent (Ag)	2	20	40	200	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.50
Arsenic (As)	6	30	50	250	3,2	3,2	2,6	3	2.7	<5.0
Baryum (Ba)	340	500	2 000	10 000	19	16	13	16	12	20
Cadmium (Cd)	1,5	5	20	100	<0.9	<0.9	<0.9	<0.9	<0.9	<0.50
Chrome total (Cr)	100	250	800	4 000	12	12	10	11	<10	13
Chrome VI (Cr ⁶⁺)	-	6	10	-	-	-	-	-	-	-
Cobalt (Co)	25	50	300	1 500	<10	<10	<10	<10	<10	3.5
Cuivre (Cu)	50	100	500	2 500	<10	<10	<10	<10	<10	5.2
Étain (Sn)	5	50	300	1 500	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<4.0
Manganèse (Mn)	1 000	1 000	2 200	11 000	122	145	110	98	106	140
Mercure (Hg)	0,2	2	10	50	-	-	-	-	-	-
Molybdène (Mo)	2	10	40	200	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.0
Nickel (Ni)	50	100	500	2 500	19	20	17	14	15	19
Plomb (Pb)	50	500	1 000	5 000	<10	<10	<10	<10	<10	5.3
Sélénium (Se)	1	3	10	50	-	-	-	-	-	-
Zinc (Zn)	140	500	1 500	7 500	14	22	15	13	12	19
HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)										
Acénaphène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Acénaphthylène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Anthracène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (a) anthracène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (a) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (b) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (j) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (k) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (b,j,k) fluoranthène (Somme) ⁵	-	-	-	136	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (c) phénanthrène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (g,h,i) pérylène	0,1	1	10	18	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Chrysène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,h) anthracène	0,1	1	10	82	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,h) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,i) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,l) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Diméthyl-1,3 naphthalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Diméthyl-7,12 benzo (a) anthracène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Fluoranthène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Fluorène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Indéno (1,2,3-cd) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-1 naphthalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-2 naphthalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-3 cholanthrène	0,1	1	10	150	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Naphtalène	0,1	5	50	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Phénanthrène	0,1	5	50	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Pyrène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Triméthyl-2,3,5 naphthalène	0,1	1	10	56	-	-	-	-	<0.10	<0.10
PARAMÈTRES INTÉGRATEURS										
Hydrocarbures Pétroliers (C ₁₀ à C ₃₀)	300	700	3 500	10 000	<100	<100	<100	<100	<100	<100

Tableau 20 : Résultats de la contamination des sols pour L3

Paramètres	Valeurs limites ou Concentration maximale acceptable				Concentration en mg/kg poids sec				
	Critère A	Critère B / Annexe I du RPRT	Critère C / Annexe II du RPRT	Annexe I du RESC	2018-08-20	2018-09-20	2018-10-10	2019-05-08	2019-06-05
MÉTAUX (et métalloïdes)									
Argent (Ag)	2	20	40	200	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.50
Arsenic (As)	6	30	50	250	3,6	3	3,7	4,5	<5.0
Baryum (Ba)	340	500	2 000	10 000	18	16	18	120	21
Cadmium (Cd)	1,5	5	20	100	<0.9	<0.9	<0.9	<0.9	<0.50
Chrome total (Cr)	100	250	800	4 000	13	12	14	14	14
Chrome VI (Cr ⁶⁺)	-	6	10	-	-	-	-	-	-
Cobalt (Co)	25	50	300	1 500	<10	<10	<10	<10	4.1
Cuivre (Cu)	50	100	500	2 500	<10	<10	<10	26	6.4
Étain (Sn)	5	50	300	1 500	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<4.0
Manganèse (Mn)	1 000	1 000	2 200	11 000	143	126	144	512	170
Mercure (Hg)	0,2	2	10	50	-	-	-	-	-
Molybdène (Mo)	2	10	40	200	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.0
Nickel (Ni)	50	100	500	2 500	20	18	20	25	21
Plomb (Pb)	50	500	1 000	5 000	<10	<10	<10	<10	5.9
Sélénium (Se)	1	3	10	50	-	-	-	-	-
Zinc (Zn)	140	500	1 500	7 500	15	16	18	64	22
HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)									
Acénaphène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Acénaphthylène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Anthracène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (a) anthracène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (a) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (b) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (j) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (k) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (b,j,k) fluoranthène	-	-	-	136	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
(Somme) ⁵	-	-	-	136	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (c) phénanthrène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (g,h,i) pérylène	0,1	1	10	18	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Chrysène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,h) anthracène	0,1	1	10	82	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,h) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,i) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,l) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Diméthyl-1,3 naphthalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Diméthyl-7,12 benzo (a) anthracène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Fluoranthène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Fluorène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Indéno (1,2,3-cd) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-1 naphthalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-2 naphthalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-3 cholanthrène	0,1	1	10	150	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Naphthalène	0,1	5	50	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Phénanthrène	0,1	5	50	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Pyrène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Triméthyl-2,3,5 naphthalène	0,1	1	10	56	-	-	-	<0.10	<0.10
PARAMÈTRES INTÉGRATEURS									
Hydrocarbures Pétroliers (C ₁₀ à C ₅₀)	300	700	3 500	10 000	<100	<100	<100	<100	<100

Tableau 21 : Résultats de la contamination des sols pour L4

Paramètres	Valeurs limites ou Concentration maximale acceptable				Concentration en mg/kg poids sec				
	Critère A	Critère B / Annexe I du RPRT	Critère C / Annexe II du RPRT	Annexe I du RESC	2018-08-20	2018-09-20	2018-10-10	2019-05-08	2019-06-05
MÉTAUX (et métalloïdes)									
Argent (Ag)	2	20	40	200	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.50
Arsenic (As)	6	30	50	250	10,9	3,5	2,8	2,9	<5.0
Baryum (Ba)	340	500	2 000	10 000	19	19	15	14	17
Cadmium (Cd)	1,5	5	20	100	<0.9	<0.9	<0.9	<0.9	<0.50
Chrome total (Cr)	100	250	800	4 000	13	13	12	<10	11
Chrome VI (Cr ⁶⁺)	-	6	10	-	-	-	-	-	-
Cobalt (Co)	25	50	300	1 500	<10	<10	<10	<10	3
Cuivre (Cu)	50	100	500	2 500	<10	<10	<10	<10	4.5
Étain (Sn)	5	50	300	1 500	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<4.0
Manganèse (Mn)	1 000	1 000	2 200	11 000	126	133	104	105	120
Mercure (Hg)	0,2	2	10	50	-	-	-	-	-
Molybdène (Mo)	2	10	40	200	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.0
Nickel (Ni)	50	100	500	2 500	19	18	16	15	16
Plomb (Pb)	50	500	1 000	5 000	<10	<10	<10	<10	<5.0
Sélénium (Se)	1	3	10	50	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<1.0
Zinc (Zn)	140	500	1 500	7 500	16	17	14	13	17
HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)									
Acénaphène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Acénaphthylène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Anthracène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (a) anthracène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (a) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (b) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (j) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (k) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (b) fluoranthène	-	-	-	136	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
(Sommmation) ⁵	-	-	-	136	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (c) phénanthrène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (g,h,i) pérylène	0,1	1	10	18	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Chrysène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,h) anthracène	0,1	1	10	82	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,h) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,i) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,l) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Diméthyl-1,3 naphtalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Diméthyl-7,12 benzo (a) anthracène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Fluoranthène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Fluorène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Indéno (1,2,3-cd) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-1 naphtalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-2 naphtalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-3 cholanthrène	0,1	1	10	150	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Naphtalène	0,1	5	50	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Phénanthrène	0,1	5	50	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Pyrène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Triméthyl-2,3,5 naphtalène	0,1	1	10	56	-	-	-	<0.10	<0.10
PARAMÈTRES INTÉGRATEURS									
Hydrocarbures Pétroliers (C ₁₀ à C ₅₀)	300	700	3 500	10 000	116	105	<100	<100	<100

C. RAPPORT DE CONSTRUCTION ENVOYÉ À WASTE
MANAGEMENT INC. EN FÉVRIER 2019